



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING

# VÝPOČTOVÝ SYSTÉM PRO VÝBĚR OPTIMÁLNÍHO ZPŮSOBU VYUŽITÍ ENERGIE GENEROVANÉ SPALOVACÍMI PROCESY

COMPUTATIONAL SYSTEM FOR SELECTION OF OPTIMAL UTILIZATION OF ENERGY FROM  
COMBUSTION PROCESSES

DIZERTAČNÍ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. MICHAL TOUŠ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV BÉBAR, CSc.

BRNO 2012

## **ABSTRAKT**

Disertační práce se zabývá aplikací simulačních a optimalizačních metod v oblasti energetického využití odpadů a biomasy.

V úvodu práce je popsán současný stav v oblasti energetického využívání odpadů a biomasy v ČR i v EU. Další kapitoly pojednávají o přístupu k vytváření matematických modelů zařízení využívaných v předmětné oblasti a jejich aplikaci pro účely simulace a optimalizace. Je poukázáno rovněž na využitelnost stochastických přístupů, které nacházejí své uplatnění při řešení mnoha reálných problémů.

Jádro práce spočívá v návrhu systematického přístupu a jeho aplikaci při vytváření simulačních a optimalizačních modelů technologických jednotek z předmětné oblasti. Přístup je demonstrováno na dvou případových studiích. První studie pojednává o tvorbě simulačního modelu s využitím provozních dat reálného zařízení na energetické využití odpadu. Obsahem druhé studie je tvorba optimalizačního modelu a jeho využití při řešení úlohy z oblasti energetického využití biomasy v reálném provozu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Energetické využití, odpad, biomasa, modelování, simulace, optimalizace

## **ABSTRACT**

PhD thesis deals with application of simulation and optimization methods in the field of waste and biomass utilization for energy purposes.

Current situation in this field is described in the introductory. Following chapters deal with approaches of creating mathematical models of apparatus and processes used in the field of interest for simulation and optimization purposes. Stochastic methods, which are widely applied for real problems solution, are mentioned as well.

The core of the thesis consists in proposal of systematic approach and its application for simulation and optimization model building used in the field of interest. The application is demonstrated through two case studies. The first one deals with the building of simulation model of an existing waste-to-energy plant using its operation data. The second study deals with optimization model building and its application for a problem regarding utilization of biomass in an existing energy system.

## **KEY WORDS**

Waste to energy, biomass energy utilization, modelling, simulation, optimization

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE**

TOUŠ, M. Výpočtový systém pro výběr optimálního způsobu využití energie generované spalovacími procesy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 108 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc..

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem dizertační práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ladislava Bébara, CSc. a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval.

V Brně, 4. května 2012

.....

Ing. Michal Touš



## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Ladislavu Bébarovi, CSc. a Ing. Martinu Pavlasovi, Ph.D. za podporu a vedení během studia a za cenné rady a připomínky při přípravě dizertační práce. Dále děkuji za náměty a cenné rady RNDr. Pavlu Popelovi, Ph.D. a prof. Ing. Petru Stehlíkovi, CSc. za poskytnutí kvalitních podmínek během studia. Děkuji také rodině a všem svým blízkým za jejich podporu, kterou mi po dobu studia poskytovali.

## OBSAH

1. ÚVOD .....	3
1.1 ŘEŠENÁ PROBLEMATIKA A MOTIVACE .....	3
1.2 ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADŮ .....	7
1.3 ENERGETICKÉ VYUŽITÍ BIOMASY .....	12
2. TEORETICKÉ ZÁKLADY POUŽITÝCH METOD .....	16
2.1 MODELOVÁNÍ ENERGETICKÝCH ZDROJŮ .....	16
2.1.1 Modelování s využitím bilancí a termodynamických modelů .....	17
2.1.2 Modelování na základě provozních dat .....	18
2.2 POČÍTAČOVÁ SIMULACE ENERGETICKÝCH ZDROJŮ .....	22
2.2.1 Simulační přístupy .....	22
2.2.2 Simulační systém W2E .....	23
2.3 OPTIMALIZACE A JEJÍ POUŽITÍ V OBLASTI ENERGETICKÝCH ZDROJŮ .....	25
2.3.1 Matematické programování .....	27
2.3.2 Využití matematické optimalizace při návrhu a plánování provozu energetických zdrojů .....	28
3. CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE A POUŽITÉ METODY .....	30
4. TECHNICKO-EKONOMICKÝ SIMULAČNÍ MODEL ZAŘÍZENÍ NA ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADŮ .....	33
4.1 POPIS TECHNOLOGICKÉ JEDNOTKY NA ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADŮ TERMIZO, A.S. ....	33
4.2 IDENTIFIKACE STĚŽEJNÍCH TECHNOLOGICKÝCH BLOKŮ A NÁVRH SIMULAČNÍHO MODELU .....	36
4.3 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ DAT A MODELOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH TECHNOLOGICKÝCH UZLŮ .....	41
4.3.1 Výhřevnost odpadu .....	41
4.3.2 Uzel výroby páry .....	46
4.3.3 Uzel výroby elektřiny na protitlaké parní turbíně .....	47
4.3.4 Uzel výroby elektřiny na kondenzační turbíně .....	51
4.3.5 Uzel exportu elektřiny .....	53
4.3.6 Uzel exportu páry do Teplárny Liberec .....	53
4.4 SESTAVENÍ MODELU CELÉHO SYSTÉMU A JEHO OVĚŘENÍ .....	54
4.4.1 Ověření modelu na provozních datech .....	56
4.4.2 Ověření modelu pomocí bilančního softwaru W2E .....	57
4.5 TECHNICKO-EKONOMICKÝ MODEL A JEHO VYUŽITÍ .....	58

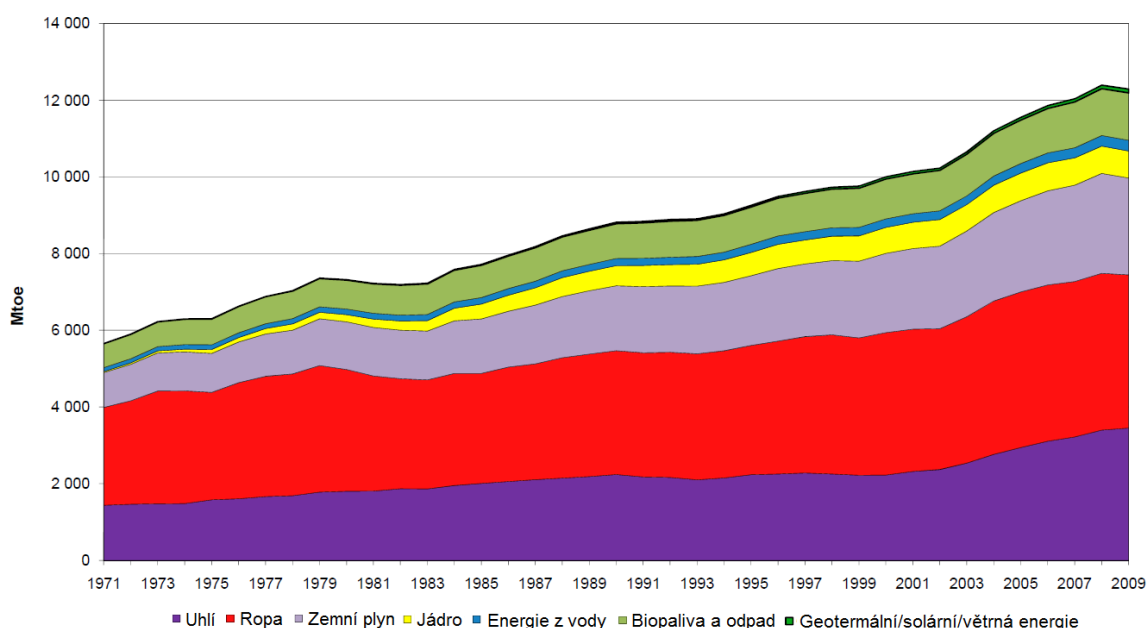
5. OPTIMALIZACE PALIVOVÉ ZÁKLADNY TEPLÁRENSKÉHO PROVOZU VYUŽÍVAJÍCÍHO UHLÍ A BIOMASOVÁ PALIVA .....	62
5.1 POPIS MODELOVÉ TEPLÁRNY .....	62
5.2 TECHNICKO-EKONOMICKÝ MODEL PRO OPTIMALIZAČNÍ ÚLOHU .....	62
5.2.1 Horkovodní a parní Kotle .....	64
5.2.2 Parní turbíny.....	65
5.2.3 Využití vyrobeného tepla a elektřiny .....	65
5.2.4 Ekonomické parametry provozu .....	66
5.3 FORMULACE A IMPLEMENTACE OPTIMALIZAČNÍ ÚLOHY .....	67
5.4 VYUŽITÍ OPTIMALIZAČNÍHO MODELU – VÝSLEDKY OPTIMALIZACE.....	69
5.4.1 Základní úloha .....	69
5.4.2 Analýza scénářů .....	71
5.4.3 Citlivostní analýza .....	72
5.4.4 Stochastický model .....	73
5.5 OBECNÝ MODEL TEPLÁRENSKÉHO PROVOZU VYUŽÍVAJÍCÍHO VÍCE PALIV .....	75
6. APLIKACE NAVRŽENÉHO POSTUPU V JINÝCH OBLASTECH.....	78
6.1 POPIS ENERGETICKÉHO SYSTÉMU KOMPLEXU BUDOV .....	78
6.2 KLIMATICKÝ MODEL.....	80
6.3 MODEL REVERZNÍ CHLADICÍ JEDNOTKY .....	82
6.4 VÝPOČET, SOUSTAVA ROVNIC .....	86
7. ZÁVĚR.....	88
POUŽITÁ LITERATURA.....	89
PUBLIKACE AUTORA.....	95
SEZNAM ZKRATEK.....	97
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....	98
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	101
SEZNAM TABULEK.....	103

## 1. ÚVOD

Využití obnovitelných a druhotných zdrojů energie je v současnosti velmi diskutovaným tématem. Obnovitelným zdrojem s velkým potenciálem nejen v rámci České republiky je biomasa. Do energetického mixu obnovitelných zdrojů energie ČR začínají promlouvat také zařízení pro energetické využití odpadů, která se v důsledku zavádění nových pravidel v nakládání s odpady jeví jako nedílná součást odpadového hospodářství. Dizertační práce reaguje na tyto aktuální trendy a snaží se přispět k jejich rozvoji.

### 1.1 Řešená problematika a motivace

Výroba energie a její zdroje jsou jedním z nejdůležitějších globálních témat. Jak je vidět z grafu na obr. 1, spotřeba energie celosvětově roste. Za rok 2010 došlo dokonce k nejvyššímu procentuálnímu nárůstu od roku 1973 a to o 5,6 % [1].



Obr. 1 Celosvětová spotřeba energie [2]

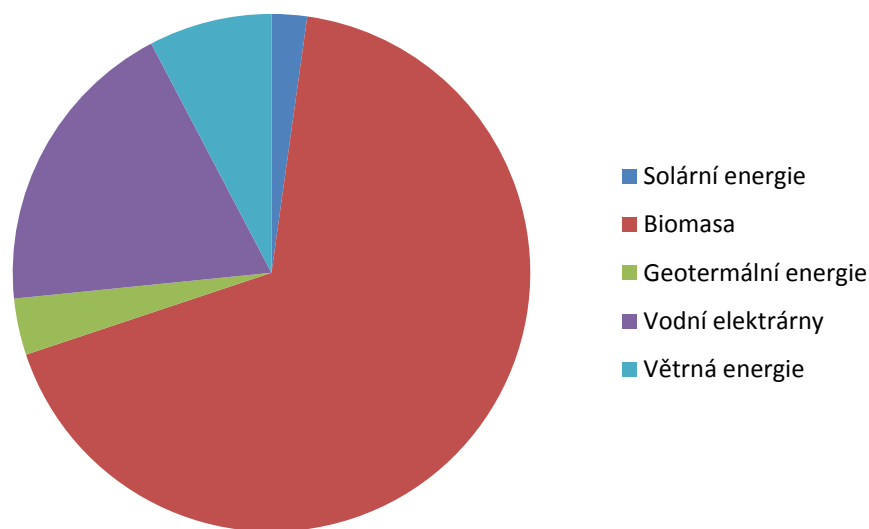
pozn.: toe – tuna olejového ekvivalentu ( $1 \text{ toe} = 41,868 \cdot 10^9 \text{ J}$ )

Jako zdroje energie stále dominují, a nějakou dobu ještě dominovat budou, fosilní paliva – uhlí, ropa, zemní plyn. Dříve či později však dojde k vyčerpání jejich zásob. V práci [3] jsou odhadnuty celosvětové zásoby ropy a zemního plynu asi na čtyřicet let a zásoby uhlí asi na sto let. Nejen omezené zásoby fosilních paliv jsou důvodem, proč se v posledních letech stále více diskutuje na téma využití obnovitelných zdrojů energie (OZE) a druhotných zdrojů energie (DZE).

V podmínkách ČR se pod pojmem OZE rozumí obnovitelné nefosilní přírodní zdroje energie, jimiž jsou energie větru, energie slunečního záření, geotermální energie, energie vody, energie půdy, energie vzduchu, energie biomasy, energie skládkového plynu, energie kalového plynu z čistíren odpadních vod a energie bioplynu [4]. Pod pojmem DZE se rozumí zdroje, jejichž energetický potenciál vzniká jako vedlejší produkt při přeměně a konečné spotřebě energie, při uvolňování z bituminozních hornin včetně degazačního a důlního plynu, nebo při energetickém využívání či odstraňování odpadů a náhradních paliv, vyrobených na bázi odpadů nebo při jiné hospodářské činnosti [4].

Dalším důvodem diskuzí na téma OZE a DZE je negativní vliv na životní prostředí, a to jak těžbou a zpracováním, tak škodlivinami, vznikajícími při jejich spalování. V souvislosti s globálním oteplováním se často hovoří o tzv. uhlíkové stopě, což je nástroj k měření dopadů lidských činností na životní prostředí a vyjadřuje množství emisí  $\text{CO}_2$ , které vznikají během celého životního cyklu výrobku, služby, apod. Uhlíková stopa tak vzniká i při využívání např. biomasových paliv (zpracování, doprava), ačkoliv samotné spalování biomasy je považováno za  $\text{CO}_2$  neutrální (na rozdíl od fosilních paliv). Hodnocením uhlíkové stopy a přínosem OZE k redukci uhlíkové stopy se zabývají např. [5] [6], .

Mezi OZE má velké zastoupení biomasa. V současné době tvoří energie z biomasy téměř tři čtvrtiny obnovitelné energie, využívané v zemích EU (viz obr. 2). Předpokládá se, že energie z biomasy bude hrát podstatnou úlohu při plnění cílů, které si EU stanovila, tedy dosažení 20% podílu energie z obnovitelných zdrojů na celkové hrubé spotřebě do roku 2020 [7] (celková hrubá spotřeba energie = výroba + import – export). Pro rozvoj využití OZE byl Evropskou komisí sestaven akční plán. Z tohoto plánu by měly vycházet národní akční plány jednotlivých členských zemí a dále pak regionální akční plány. Cíl ČR na rok 2020 je stanoven na 13 % energie z obnovitelných zdrojů. Navržený scénář vývoje podílu OZE na hrubé domácí spotřebě, obsažený v Národním akčním plánu, počítá dokonce s hodnotou o 0,5 % vyšší, tedy s 13,5 % [8]. V roce 2010 se v ČR podílela elektřina z obnovitelných zdrojů energie na celkové hrubé domácí spotřebě ve výši 8,3 %, čímž byl naplněn průběžný cíl na rok 2010, stanovený na 8 % [9]. Na biomasu připadá 25 % elektřiny vyrobené z OZE [9]. Je důležité zdůraznit, že cíl na rok 2020 se vztahuje jak na teplo tak elektřinu, zatímco cíl na rok 2010 byl vztažen pouze na elektřinu.



Obr. 2 Podíl různých druhů OZE na výrobě energie v EU v roce 2010 [10]

Energetické využití odpadů (EVO) tvoří jen malou část celkové spotřeby energií. Poslední dostupné statistiky se vztahují k roku 2010, kdy podíl elektřiny z biologicky rozložitelné části tuhého komunálního odpadu na hrubé výrobě elektřiny činil 0,04 % a podíl tepla na hrubé výrobě tepla 0,3 % [11]. Tento podíl jistě od roku 2010 vzrostl díky rekonstrukcím a modernizacím stávajících zařízení na energetické využití odpadů, o kterých je zmínka v kapitole 1.2. A dá se předpokládat, že podíl energie z odpadů poroste i dále v důsledku zavádění hierarchie nakládání s odpady (obr. 3), uvedené v rámcové

směrnici o odpadech 2006/12/EC [12], do koncepcí odpadového hospodářství členských států a plnění závazků vůči EU. Proto je tato problematika aktuální a je třeba se jí zabývat.



*Obr. 3 Hierarchie nakládání s odpady [13]*

Dizertační práce měla za cíl vytvořit nástroje pro energetické a ekonomické vyhodnocení provozů v oblasti energetického využití odpadů a biomasy a poskytnout podporu při rozhodnutích, která se této problematice týkají. Práce se orientuje zejména na využití pokročilých matematických metod pro podporu návrhu a hodnocení efektivity energetického využití odpadů a biomasy. Autor je pracovníkem sekce energetických systémů a simulačních výpočtů na Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Přístupy navržené v této práci umožňují řešit problematiku, kterou se sekce zabývá, a tvoří základ činností, jež jsou rozvíjeny v dalších dizertačních pracích. Přehled aktivit celé sekce ukazuje tab. 1. Do aktivit podbarvených oranžově spadá problematika řešená v této práci.

Tab. 1 Přehled aktivit

pozn.: KVET – kombinovaná výroba elektřiny a tepla

R1 – kritérium pro hodnocení jednotek na energetické využití odpadu

ŘEŠENÁ PROBLEMATIKA					
Vyhodnocení provozních parametrů	Tvorba technicko-ekonomických modelů	Optimalizace palivové základny v existujících zařízeních	Optimalizace a hodnocení investičních záměrů	Dopravní úloha - minimalizace dopravních nákladů	Vývoj parametrů v budoucnosti
Příklady					
<ul style="list-style-type: none"> <li>- zpřesnění výhřevnosti a účinnosti spalovenských kotlů</li> <li>- legislativní ukazatele (elektřina z KVET, elektřina z OZE při spalování, R1 pro EVO)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- simulace různých provozních stavů</li> <li>- vyčíslení výrobních nákladů v provozních stavech</li> <li>- závislost výroby elektřiny a tepla</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- optimální využití palivové základny u více palivových systémů v průběhu toku</li> <li>- využití (spolupráce) existujících zařízení</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- volba optimální kapacity klíčových uzlů</li> <li>- rekonstrukce existujícího systému</li> <li>- výstavba na "zelené louce"</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- rozmístění klíčových dopravních uzlů (překladiště, energetické zdroje, ...)</li> <li>- logistika</li> <li>- určení optimální svazové oblasti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ceny energií, paliv, ...</li> <li>- poptávka po energiích</li> <li>- výše dotací, povolenek, ...</li> </ul>
POUŽÍVANÉ NÁSTROJE					
Tvorba matematického modelu systému	Optimalizační úloha	Uživatelské rozhraní (GUI)	Citlivostní analýza	Implementace legislativy	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- termodynamické modely (hmotnostní a energetické bilance)</li> <li>- software W2E (Waste-to-Energy)</li> <li>- detailní regresní analýza dostupných provozních dat</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- deterministická</li> <li>- stochastická scénáře</li> <li>- víceetapňovost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- platforma MS Office (Excel)</li> <li>- profesionální rozhraní (Platforma Java)</li> <li>- software W2E (Waste-to-Energy)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- statistické zpracování a vyhodnocení</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zapracování legislativních ukazatelů do modelu</li> </ul>	
VSTUPNÍ DATA PRO PŘÍPADOVÉ STUDIE					
Topologie systému	Provozní data		Ekonomické parametry		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- technologické schéma (blokové, PID)</li> <li>- informace o provozu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- měsíční bilance</li> <li>- 15 min až 1 h průměry</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- koncepce</li> <li>- okamžité provozní stavy</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- investiční náklady</li> <li>- fixní a variabilní náklady</li> <li>- průměrné ceny energetických produktů</li> <li>- detailní vyhodnocení diagramů pro stanovení ceny energetických produktů</li> </ul>		

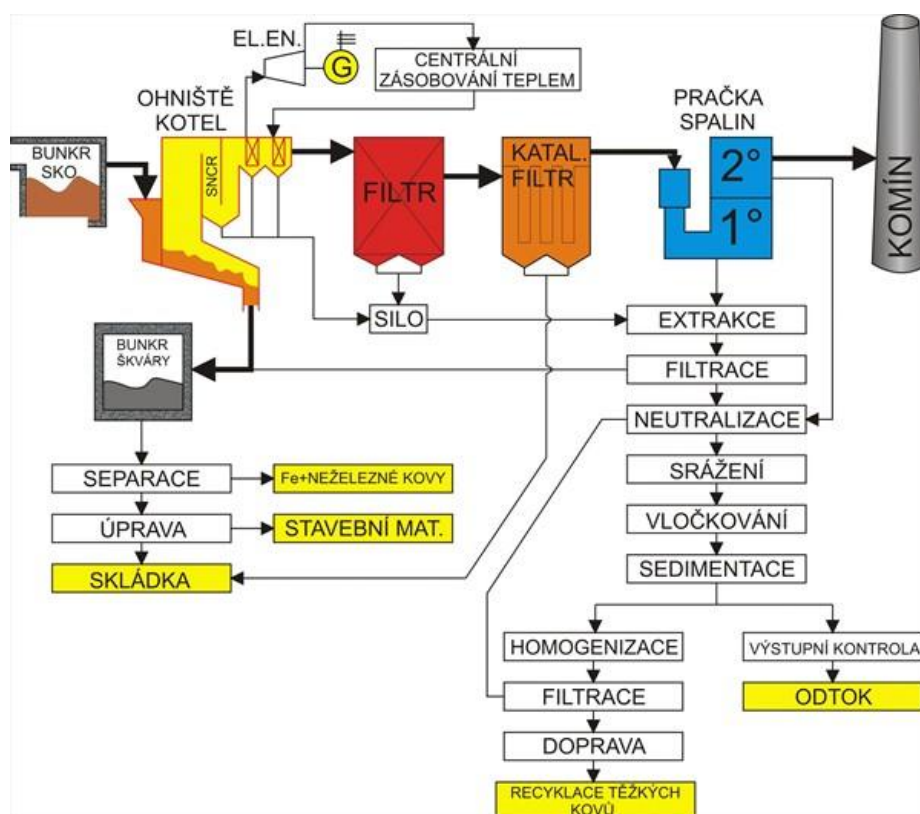
## 1.2 Energetické využití odpadů

Energetickým využitím odpadu se rozumí použití odpadů hlavně způsobem obdobným jako paliva za účelem získání jejich energetického obsahu nebo jiným způsobem k výrobě energie [14]. Energetické využití odpadů je jedním ze způsobů jak nakládat s komunálními odpady.

Komunální odpad je definován jako veškerý odpad vznikající na území obce činností fyzických osob, pro kterou nejsou právními předpisy stanovena zvláštní pravidla nebo omezení, s výjimkou odpadů vznikajících u právnických osob nebo osob oprávněných k podnikání. Komunálním odpadem se také rozumí odpad vznikající při čištění veřejných komunikací a prostranství a při údržbě veřejné zeleně.[14]. U komunálního odpadu tvoří 50 až 65 % hmotnosti biologicky rozložitelné složky (biologicky rozložitelný komunální odpad – BRKO) [11], které se považují rovněž za obnovitelný zdroj. BRKO je jakýkoli odpad, který podléhá aerobnímu nebo anaerobnímu rozkladu [14].

Energetické využití odpadů představuje využití jejich energetického potenciálu, čímž přispívá k úsporám primárních neobnovitelných zdrojů energií (fosilních paliv) a tím zmírňuje negativní dopady jejich využívání na životní prostředí. Moderní zařízení na energetické využití odpadů, navržené na základě sestavy doporučených technologií BAT (Best Available Technology) a vybavené moderním systémem čištění spalin, představují ekologicky bezpečnou technologii. Ačkoliv pojmy zařízení na energetické využití odpadů a „spalovna“ neznamenají totéž, často je pojem „spalovna“ používán i pro zařízení na energetické využití odpadů. Veřejnost však vnímá označení „spalovna“ mnohem negativněji [16]. Nicméně pro lepší čitelnost textu je dále pojmem „spalovna“ označováno i zařízení pro energetické využití odpadů.

Typické technologické schéma zařízení na energetické využití odpadů je na obr. 4. Proces spalování odpadu je navržen tak, aby zajišťoval jeho optimální vyhoření. Standardní



Obr. 4 Technologické schéma zařízení na energetické využití odpadů [15]



je použití dvoustupňového spalování, aby byl zajištěn dokonalý termický rozklad nebezpečných látek. V prvním stupni (roštové ohniště v případě zpracování tuhých komunálních odpadů) je odpad spalován při teplotách 850 až 1100°C. Ve druhém stupni (sekundární komora) je pak dokončen rozklad i těch nejstabilnějších látek jejich setrváním v oblasti teplot (nad 850 °C) dle platné legislativy [17]. Škvára je z ohniště odebírána a umisťována do bunkru škváry. Jsou z ní odseparovány železné předměty a další kovy a poté je využívána např. ve stavebnictví. Například spalovna TERMIZO, a.s. v Liberci v roce 2010 energeticky využila 98 750 tun odpadu. Z tohoto množství vyprodukovala spalovna 30 613 tun pevného zbytku po spalování. Z něj se materiálově využívá 20 415 tun certifikovaného stavebního výrobku z popelovin (SPRUK) a jako druhotná surovina vzniká separovaný železný šrot (855 tun) [18]. Nevyužitelný podíl putoval na skládku.

Většina provozů využívá pro výrobu energií páru. Výroba páry je uskutečněna v kotli, kde vzniklé spaliny předávají své teplo napájecí vodě. U spaloven je velice problematické zjišťování účinnosti kotle kvůli proměnlivé výhřevnosti odpadu [19]. Pára je přiváděna do turbogenerátoru, kde je vyráběna elektřina. Pára za turbogenerátorem je následně vedena do technologických procesů nebo do soustavy zásobování teplem, kde je její energie převedena do vody, vytápějící obytné zástavby. Spaliny jsou po opuštění kotle vedeny do systému čištění spalin. Existuje více variant uspořádání systému čištění spalin. Jedna z možných variant je uspořádána tak, že spaliny jsou nejprve v elektrofiltru zbaveny popílku, tzv. tuhého úletu. V katalytickém filtru probíhá odstranění zbytkového popílku a katalyticko-oxidační destrukce persistentních organických látek (POP), zejména polychlorovaných dibenzodioxinů a polychlorovaných dibenzofuranů (PCDD/F). Dále spaliny procházejí pračkou spalin, kde jsou škodliviny pomocí chemicko-fyzikální absorpce převedeny do prací vody. Na vhodném místě kotle je do spalin dávkován redukční prostředek umožňující přeměnu oxidů dusíku na molekulární dusík, který je přirozenou součástí ovzduší [20].

Primárním účelem spaloven je však likvidace odpadu při dodržení předpisů na ochranu životního prostředí, zejména ovzduší. Termickou likvidací se objem redukuje zhruba na 10 % původního objemu a asi na 1/3 původní hmotnosti. V ČR v současnosti stále převládá skládkování [21]. V důsledku zavádění hierarchie nakládání s odpady se od něho ustupuje. Výhodou spalování, oproti přímému skládkování, není jen zmenšení objemu, ale také likvidace nežádoucích látek, které při skládkování vznikají. Ze skládek odpadů se uvolňuje skládkový plyn, jehož největší podíl tvoří metan - skleníkový plyn. Na některých skládkách je tento plyn jímán a využíván v kogeneračních jednotkách.

Rámcová směrnice EU 2008/98/EC [22] udává, kdy je spalování odpadu považováno za energetické využití. Ve výše zmíněné hierarchii je EVO zařazeno před skládkování. Cílem je recyklace co největšího množství energie a materiálu, až poté likvidace zbylého odpadu. Problémem, který často znesnadňuje nebo až znemožňuje dodržování této hierarchie, je nedůvěra v ekologičnost a zdravotní nezávadnost spaloven. Je třeba si uvědomit, že pro provoz moderních spaloven platí přísná kritéria a jejich provoz i emise jsou neustále monitorovány. Není třeba se obávat vysokého obsahu dioxinů nebo těžkých kovů, jak tomu mohlo být v minulosti [23]. Aspekt důvěry veřejnosti je v případě spaloven velmi důležitý, protože pro vyrobenou tepelnou energii je třeba odpovídající odbyt – často je nezbytné, aby byla spalovna postavena v blízkosti lidských obydlí.

Může také vyvstat otázka, zda nebude EVO bránit snaze o recyklaci odpadů. Pokud se zaměříme na situaci v zemích s progresivním odpadovým hospodářstvím, jako je například Německo nebo Nizozemsko, je zřejmé, že s rostoucí mírou EVO i materiálová recyklace dosahuje velmi uspokojivých hodnot. V Německu se v roce 2010 energeticky využilo asi 38 % a materiálově recyklovalo asi 45 % odstraněných odpadů. V Nizozemí je to 40 %, respektive 33 % [10].

V ČR se v roce 2010 vyprodukovalo celkem 4 685 kt komunálního odpadu, z toho 3 091 kt tvořil směsný komunální odpad a 486 kt objemný odpad. Směsný komunální odpad je odpad, který zůstává po oddělení využitelných složek a nebezpečných složek z komunálních odpadů. Objemný komunální odpad je domovním odpadem (respektive odpadem z domácností), který vzhledem ke svým rozměrům nebo hmotnosti nelze odkládat do běžných sběrných nádob (80-1100 dm<sup>3</sup>). Vývoj produkce komunálních odpadů od roku 2004 je uveden v tab. 2.

Tab. 2 Vývoj produkce komunálních odpadů [21]

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
<b>Komunální odpad celkem</b>	4 655 000	4 436 000	3 979 000	4 392 298	4 601 727	4 794 665	4 684 552
Směsný komunální odpad (SKO)	2 854 000	2 741 000	2 758 000	2 812 356	2 954 102	3 236 264	3 090 806
Objemný odpad	284 000	316 000	326 000	383 718	434 609	506 482	486 444
Ostatní složky	548 918	405 204	171 002	312 281	343 660	151 148	143 090

ČR se zavázala, že do roku 2020 odkloní od skládkování 75 % BRKO ve srovnání s rokem 1995. Pro plnění tohoto závazku je zřejmé, že spoléhat na pokles produkce komunálního odpadu (KO) a jejich výraznější oddělený sběr s následným uplatněním na trhu druhotných surovin je cestou nekonstruktivní. Dle statistik roste produkce KO s růstem hrubého domácího produktu [24], proto nelze do budoucna očekávat stagnaci nebo dokonce pokles produkce KO. Ani reálné zvýšení podílu separovaných odpadů určených k materiálovému využití zásadně neovlivní celkovou bilanci rozdělení toků KO [21].

Aby byly splněny závazky ČR vůči EU, musí v odpadovém hospodářství ČR dojít k výrazné změně. Podíl skládkování se musí výrazně snížit a většina odpadů, dnes směřujícího na skládky, bude muset být po vytrídění složek určených k opětovnému materiálovému využití, jako jsou papír, plasty a sklo, zpracováno termicky. Tab. 3 obsahuje odhad odklonu od skládkování v letech 2013 a 2020 vzhledem k závazkům ČR vůči EU. Model použitý v [21] předpokládá, že v roce 2020 se bude jednat o 3 350 kt/r odpadů, které jsou vhodné k termickému zpracování a budou muset být zpracovány jinou metodou, než je skládkování.

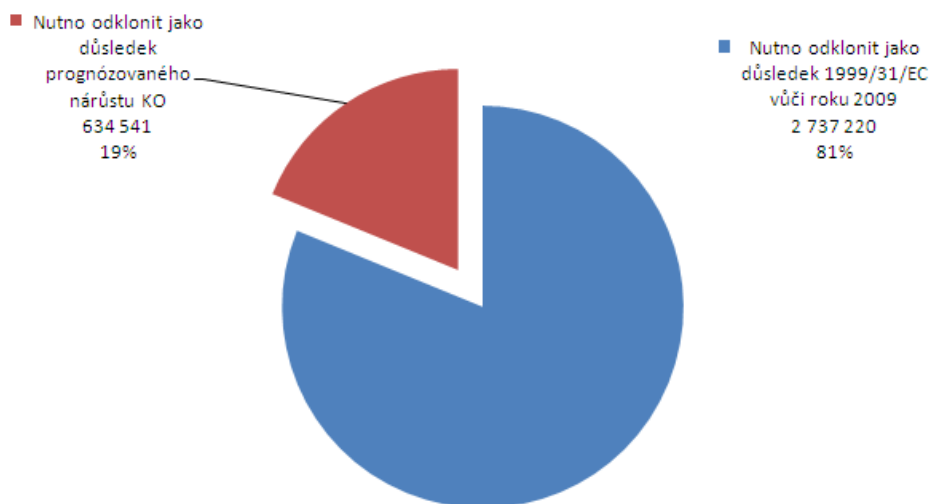
Tab. 3 Množství KO určených k termickému zpracování [21]

	2013	2020
SKO produkce (t)	3 986 493	3 236 264
Nutno odklonit od skládkování SKO (t)	<b>1 827 716</b>	<b>2 850 013</b>
OO produkce (t)	540 129	623 894
OO materiálově využití (t)	58 334	124 779
OO k termickému zpracování (t)	481 795	499 115
<b>Množství KO k termickému zpracování (t)</b>	<b>2 309 511</b>	<b>3 349 128</b>

Obr. 5 přitom ukazuje, že z tohoto množství pouze 19 % je důsledkem očekávaného nárůstu produkce KO v roce 2020 ve srovnání s rokem 2009. Většina, tj. 81 % uvedeného množství, což představuje více než 2 700 kt odpadů k odklonění, je důsledkem plnění závazků ČR vůči EU. Jedná se tedy o hodnotu nezatíženou přesností predikce nárůstu

produkce KO. Do úvahy připadají následující dva koncepční směry, které jsou hojně diskutovány:

- procesy mechanicko – biologické úpravy (MBÚ) s následným energetickým využitím lehké frakce (LF) (nejvíce výhřevná složka SKO),
- zpracování v zařízeních pro termické zpracování s využitím energie.



Obr. 5 Množství KO k termickému zpracování jako kombinace závazků ČR vůči EU a očekávaného vývoje produkce KO

Zpracování odpadů cestou mechanicko-biologické úpravy není sice v této práci detailněji rozebíráno, ale je třeba zmínit, že využitelnost procesu MBÚ je v odborných kruzích předmětem řady diskusí. V současnosti jsou v ČR provozovány tři jednotky na energetické využití odpadů. Dnes už všechny využívají energii z odpadů kogeneračním způsobem – tedy současnou výrobou tepla a elektřiny. Jsou to SAKO Brno, a.s., ZEVO v Praze Malešicích, které je součástí společnosti Pražské služby, a.s., a TERMIZO, a.s. v Liberci.

#### SAKO Brno, a.s.

Spalovna SAKO prošla nedávno rekonstrukcí a modernizací, jejichž hlavními body byly montáž parní odběrové turbíny o výkonu 22,7 MWe a instalace dvou nových kotlů, každý o výkonu 40 t/h páry o tlaku 4,2 MPa a 14 t/h spalovaných odpadů. Dále lze zmínit nový systém čištění spalin a dotřídovací linku separovaných složek KO.

Výsledkem rekonstrukce je roční zpracovatelská kapacita 242 000 t odpadu, předpokládaná roční dodávka tepla 690 TJ, což odpovídá asi třetině spotřeby v Brně, a předpokládaná výroba elektřiny asi 94,5 GWh. Spalovna je také schopna pracovat v různých režimech výroby energie a tudíž optimalizovat podle aktuálních požadavků podíl mezi vyrobenou tepelnou a elektrickou energií bez omezení výkonu.

#### ZEVO Praha Malešice, Pražské služby, a.s.

V zařízení pro energetické využití odpadů v Malešicích jsou umístěny celkem čtyři parní kotle ČKD Dukla, každý o spalovacím výkonu 15 t/h odpadu a 36 t/h páry o tlaku 1,37 MPa a teplotě 235 °C. Celkem tak spalovna dokáže energeticky využít až 310 000 t KO ročně, zatím ale byla využívána pouze asi ze dvou třetin. Dosud tak spalovala přibližně 80 % pražského KO. Po modernizaci byla uvedena do provozu kogenerační jednotka

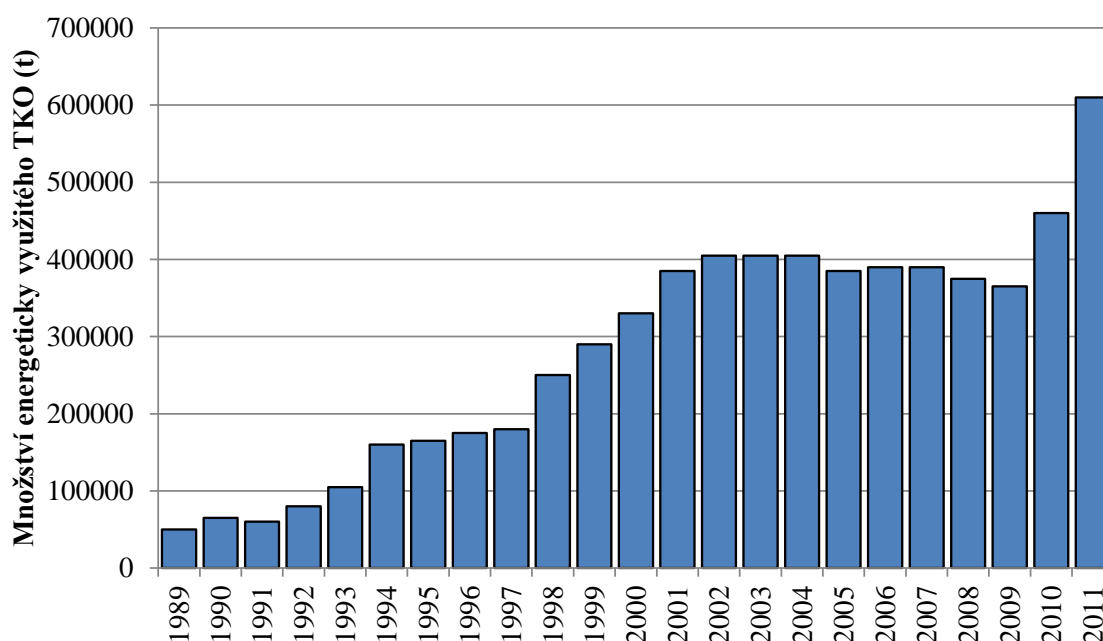
s turbínou o výkonu 17,6 MWe. Spalovna tak ročně vyrobí asi 1 000 TJ tepla a 90 GWh elektřiny.

### TERMIZO, a.s.

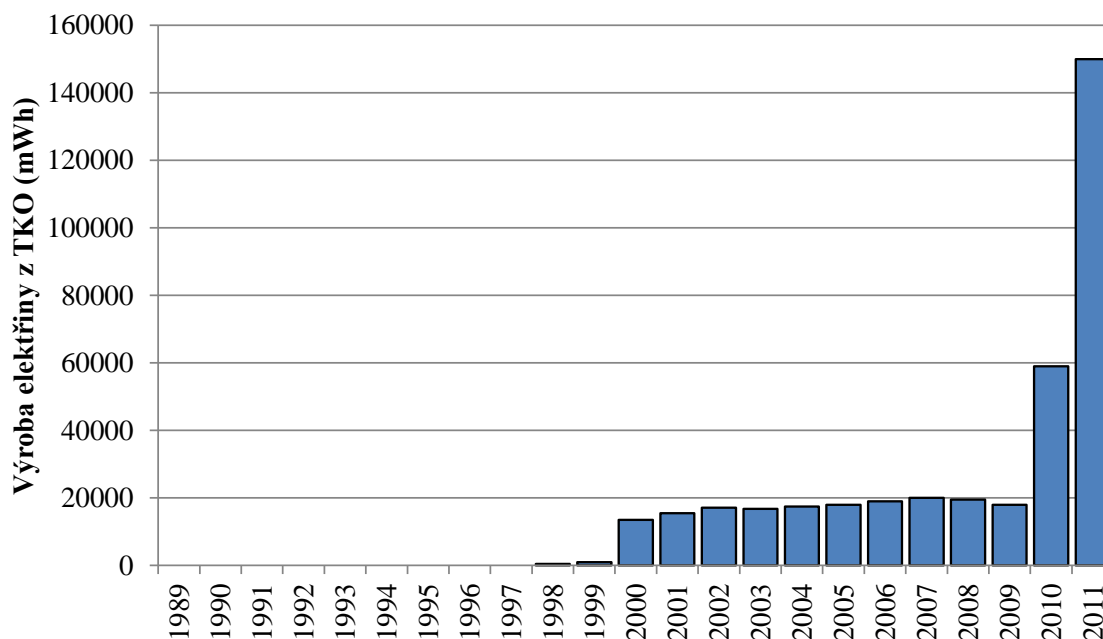
Nejnovějším zařízením na energetické využití odpadů v ČR je liberecká spalovna TERMIZO. Za rok zpracuje v průměru 93 000 t převážně KO, přičemž využívá své kapacity asi na 95-100 %. Vyrobená tepelná energie činila za rok 2010 téměř 1 MJ, z toho bylo necelých 700 GJ dodáno do systému centrálního zásobování teplem. Elektřiny bylo vyrobeno asi 20 GWh, z čehož asi polovina byla dále prodána do sítě.

Z hlediska technologie má spalovna zpracovatelskou kapacitu linky 12 t odpadu za hodinu, v parním kotli může být vyrobeno za hodinu až 43 t páry o tlaku 4,3 MPa a teplotě 400 °C. K výrobě elektrické energie slouží protitlaková turbína o výkonu 2,5 MWe a od roku 2010 také kondenzační turbína o výkonu 1 MWe.

Obr. 6 ukazuje efekt výstavby a rekonstrukcí u zmíněných spaloven na množství energeticky využitého TKO. Zde jsou vidět výrazné nárůsty po roce 1999 a v letech 2010 a 2011. Také další graf (obr. 7) ukazuje efekt rekonstrukcí, tentokrát na výrobu elektřiny. Instalace kondenzační odběrové turbíny na spalovně SAKO Brno a ZEVO Malešice a instalace kondenzační turbíny na spalovně TERMIZO výrazně změnily možnosti provozů, což se projevuje výrazným nárůstem výroby elektřiny z odpadu, až o 750 %. V současnosti jsou v pokročilém stádiu příprav tři projekty na výstavbu zařízení na energetické využití odpadů. V moravskoslezském kraji je plánováno zařízení KIC – Karviná, jehož zpracovatelská kapacita by měla být 192 kt/r. Dále se plánuje zařízení ZEVO Chotikov se zpracovatelskou kapacitou 95 kt/r, které je plánováno v Plzeňském kraji. V ústeckém kraji je to pak zařízení EVO Komořany, jehož zpracovatelská kapacita by měla být 150 kt/r. Uvedení těchto zařízení do provozu se plánuje koncem roku 2015. Ani toto navýšení celkové roční zpracovatelské kapacity spaloven na území ČR není dostatečné. Proto se uvažuje o dalších lokalitách. Rozmístění existujících a potenciálních zařízení je na obr. 8. Obrázek také ukazuje potenciální kapacity pro využití LF v elektrárnách teplárnách nebo cementárnách. Na většině zařízení již proběhly spalovací zkoušky.

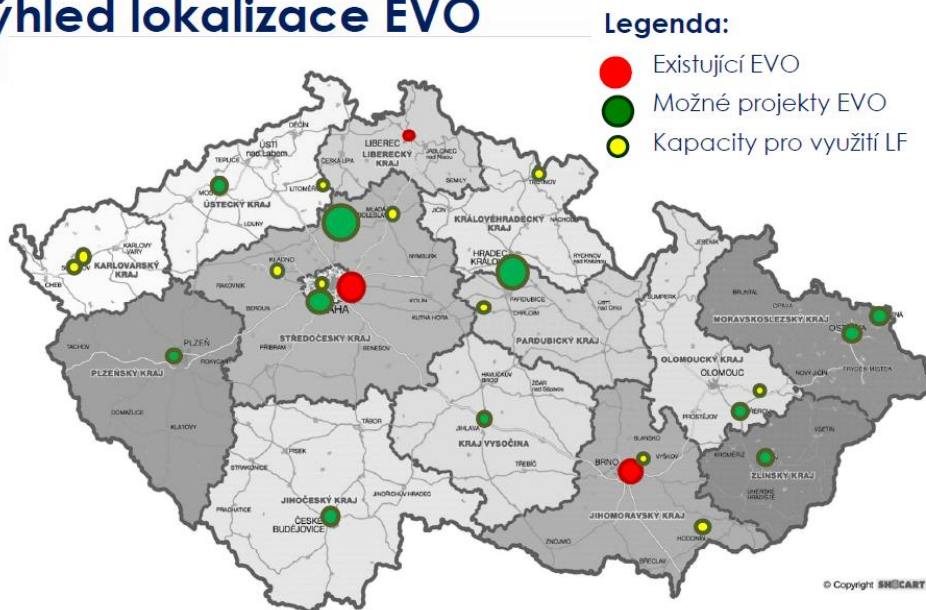


Obr. 6 Vývoj množství energeticky využitého TKO [25]



Obr. 7 Vývoj výroby elektřiny z TKO [25]

## Výhled lokalizace EVO



Obr. 8 Rozmístění existujících a plánovaných zařízení EVO

### 1.3 Energetické využití biomasy

Biomasa je organická hmota rostlinného nebo živočišného původu. Může být získávána buď jako odpad ze zemědělské, průmyslové činnosti nebo jako komunální odpad, nebo může být výsledkem záměrné výrobní činnosti a pěstování v zemědělství, lesnictví (pěstování dřevin a rostlin) [26]. Využití biomasy pro energetické účely je jedním ze způsobů náhrady fosilních paliv. V případě velkých energetických zdrojů jde převážně o částečnou, nikoliv úplnou, náhradu fosilních paliv, tzv. spoluspalování. Spoluspalování biomasy a fosilních paliv představuje časově nenáročný a levný způsob jak zvýšit podíl

obnovitelných zdrojů energie [27], [28]. Nejčastěji se jedná o spoluspalování s uhlím. Při spoluspalování se totiž využívá stávajícího zařízení, na kterém stačí provést minimální úpravy jako zbudování dopravní cesty, apod. Zdroj [29] uvádí tři základní způsoby spoluspalování biomasy s uhlím:

- přímé
- nepřímé
- paralelní.

Přímé spoluspalování představuje nejlevnější a nepoužívanější způsob. Biomasa je přidávána do kotle spalujícího uhlí. Většina běžně používaných typů kotlů (granulační, fluidní, roštové) je pro tyto účely vhodná. Nepřímé spoluspalování spočívá ve zplyňování biomasy. Vyrobené plynné palivo je pak spalováno v kotli spolu s uhlím. Výhodou tohoto způsobu je možnost využití různých druhů biomasy. Navíc lze plyn předčistit tak, aby byl minimalizován negativní vliv produktů spalování plynu na výkon kotle. Při paralelním spoluspalování je biomasa spalována v kotli samostatně. Následně lze páru vyrobenou v tomto kotli využít v parním systému, napojenému na uhelné kotle, nebo ve vlastním parním systému.

Spoluspalování se tudíž v současné době jeví jako jedna z rychle realizovatelných možností zvýšení podílu biomasy na výrobě elektrické energie.

Jedním z pozitivních dopadů spoluspalování je vytvoření trhu s komoditami, které by jinak nebyly energeticky využity. Naproti tomu některé zdroje, např. [30], uvádí, že spoluspalování lokální trh s biomasou ničí, protože velcí výrobci energií nabízejí za biomasu vyšší ceny, než si mohou dovolit menší lokální spotřebitelé biomasy. Další výhodou spoluspalování biomasy s uhlím je možnost snížení produkovaných emisí  $\text{SO}_x$ , protože biomasa obsahuje méně síry [31]. Podíl spoluspalované biomasy závisí na způsobu spoluspalování a na technických parametrech zařízení.

Za účelem odhadnutí potenciálu spoluspalování biomasy v elektrárnách nebo teplárnách kotlích bylo ve světě sestaveno několik výzkumných týmů, které přinesly pilotní projekty systému spoluspalování [32]. V rámci EU má spoluspalování biomasy v provozech využívajících uhlí velký potenciál. V práci [33] jsou rozebrány dva případy. V prvním se uvažuje s provozy vystavěnými po roce 1967, ve druhém s provozy vystavěnými po roce 1977, jelikož by stáří provozů mohlo ovlivnit možnost jejich využití pro účely spoluspalování biomasy. V prvním případě se jedná asi o 90 % všech provozů v zemích EU, ve druhém asi o 50 %. Technický potenciál činí 500 až 900 PJ biomasy za rok, což odpovídá výrobě elektřiny 50 až 90 TWh za rok (nižší hodnota je pro první případ, vyšší hodnota je pro druhý případ).

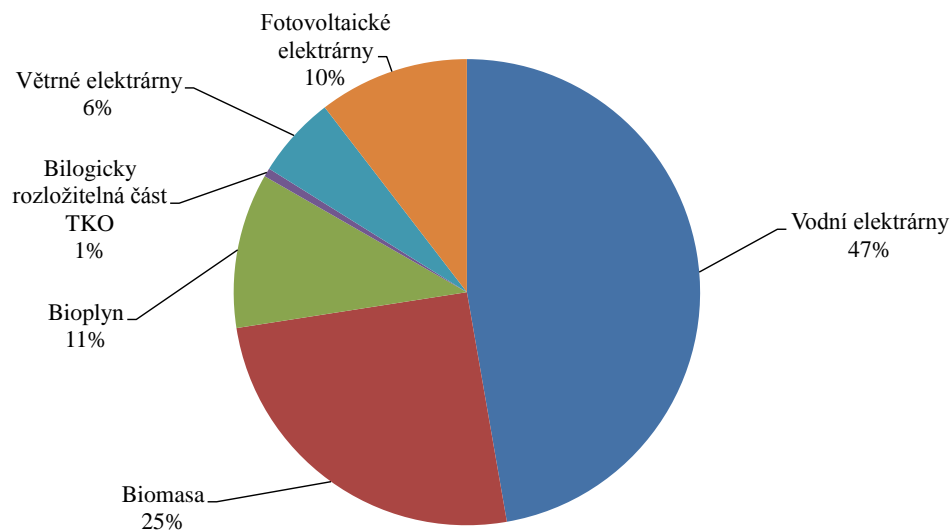
V podmínkách ČR má biomasa největší technicky využitelný potenciál ze všech obnovitelných zdrojů. Elektřina vyrobená z biomasy nemá problémy se stabilitou dodávek a stabilitu lze dále maximalizovat současným využíváním biomasy spolu s fosilními palivy. Existují zde ale také jiné než technické limity. Jedná se především o dopravní dostupnost. Uvádí se, že pěstování biomasy k energetickým účelům je efektivní pouze v okruhu do 50 km od uvažovaného využití.

Spoluspalování je uznávaný způsob využití OZE rovněž v akčním plánu Evropské komise z roku 2005. Dále ho uznává mnoho států a vlád, které pro zvýšení podílu výroby elektrické energie z biomasy zavedly specifické finanční nástroje pro podporu využití biomasy a její spoluspalování v existujících a nově budovaných uhelných elektrárnách (např. v ČR se jedná o systém zelených bonusů).

Spotřeba biomasy k energetickým účelům v ČR každoročně stoupá. V roce 2010 bylo k energetickým účelům spotřebováno 82,8 PJ energie vázané na paliva biomasového původu. Z tohoto množství bylo více než 59 % využito v domácnostech k výrobě 30,7 PJ

tepla s účinností 63 %. Zbývající část (34,3 PJ) byla využita mimo domácnosti k výrobě tepla (16,1 PJ) a elektřiny (1 492 GWh, tj. 5,4 PJ). Účinnost využití tohoto potenciálu biomasy ve zdrojích mimo domácnost dosahuje 47% v případě tepla a 15,7% v případě elektřiny [34].

Výroba elektřiny z biomasy v posledních letech stoupá v průměru o 20%, rovněž v důsledku platnosti zákona 180/2005 Sb. o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů (bude nahrazeno [4]). Výroba elektřiny z biomasy tak svým dílem přispěla k naplnění národního indikativního cíle pro ČR ve výši 8 % podílu výroby elektřiny z OZE na hrubé spotřebě v roce 2010. Skutečný podíl výroby elektřiny z OZE v roce 2010 činil 8,3%. Podíl biomasy na výrobě elektřiny z OZE činil cca 25% (viz obr. 9) [11].



Obr. 9 Rozložení výroby elektřiny z OZE v ČR v roce 2010

Pro další období bude ČR opět usilovat o dosažení dalšího cíle v podpoře využívání obnovitelných zdrojů. V souladu se směrnicí EU 2009/28/EC o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů je pro ČR závazný cíl podílu energie z obnovitelných zdrojů na hrubé konečné spotřebě energie ve výši 13 % v roce 2020. Na rozdíl od cíle pro rok 2010 zahrnuje nový cíl rovněž výrobu tepla z OZE. Směrnice zavazuje členské státy přijmout opatření a programy podpory, které povedou ke zvyšování výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů. Každý členský stát přijme národní akční plán pro energii z OZE (NAP). V ČR byl Národní akční plán pro energii z OZE schválen Usnesením vlády ČR č. 603 dne 25.srpna 2010, čímž byl rovněž stanoven cíl energie z OZE na hrubé konečné spotřebě energie v roce 2020 13,5 %, to je o 0,5 % více než původní závazek.

Z důvodu implementace směrnice 2009/28/EC byl předložen do schvalovacího procesu zákon o podpoře využívání energie z obnovitelných a druhotných zdrojů a z vysoce účinné kombinované výroby elektřiny a tepla (zákon o podporovaných zdrojích energie). Cílem tohoto zákona je nastavení dlouhodobě stabilních a životaschopných podmínek podpory výroby energie z obnovitelných zdrojů na dobu minimálně do roku 2020. Navrhovaný zákon odstraňuje nedostatky současného právního stavu a mimo jiné umožňuje zastavení vyplácení podpory pro určitý druh OZE při dosažení limitů elektrizační soustavy absorbovat výrobu elektřiny z OZE, nebo při dosažení požadovaného podílu daného druhu OZE na celkovém mixu OZE.

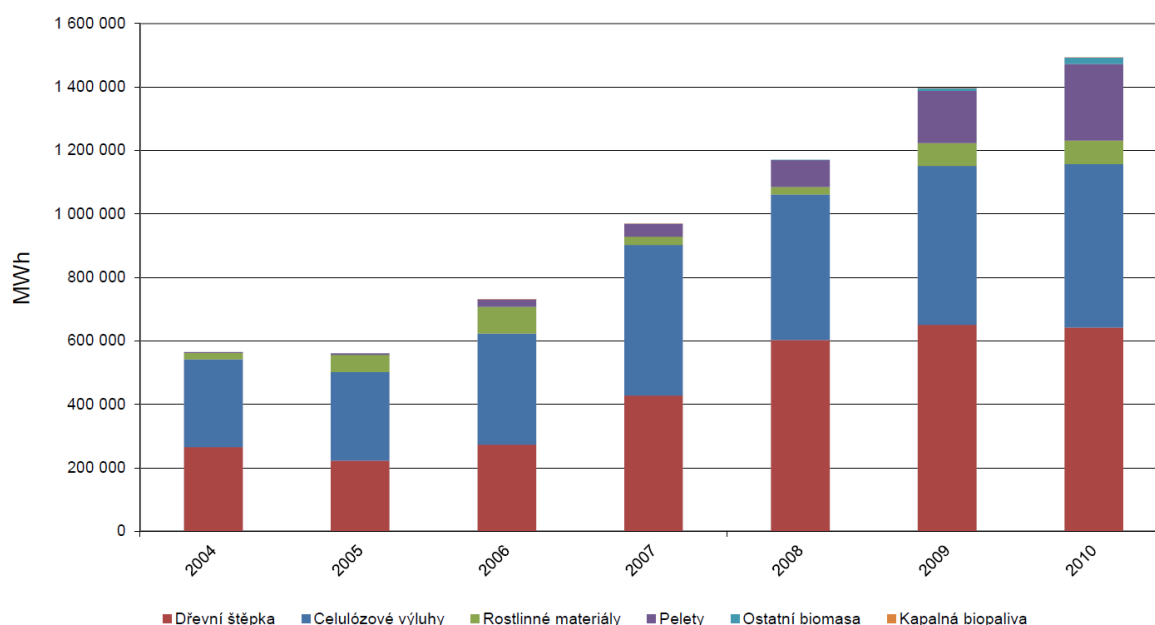


NAP předpokládá, že v roce 2020 bude v oblasti výroby elektřiny z biomasy (tzn. mimo domácnost) vyrobeno cca 3 050 GWh elektřiny (v roce 2010 bylo přitom z biomasy 1 500 GWh elektřiny). V oblasti výroby tepla předpokládá NAP, že se v roce 2020 vyrobí mimo domácnosti 37 PJ tepla (odhad výroby v roce 2010 činí 16 PJ) [34].

Pro splnění cílů do roku 2020 tedy NAP předpokládá v oblasti výroby tepla a elektrické energie z biomasy mimo domácnosti oproti stavu v roce 2010:

- navýšení výroby tepla o 21 PJ
- navýšení výroby elektřiny o 1 670 GWh.

Největší zastoupení má v biomasových palivech dřevní štěpka. Meziroční nárůst vyrobené elektřiny z biomasy v posledních letech činil zhruba 100 000 až 200 000 MWh (viz obr. 10).



Obr. 10 Vývoj výroby elektřiny z biomasy [11]

V rámci České republiky má v následujících letech dojít k omezení těžby hnědého uhlí, které představuje základní palivo pro mnoho energetických zdrojů. Vzhledem k tomu, že mnoha subjektům končí smlouvy na dodávky uhlí v období kolem roku 2015 a kvůli poklesu těžby nemají zajištěno další prodloužení smluv [35], právě využití biomasy představuje způsob, jak alespoň částečně nahradit chybějící uhlí. Problém ale je, že řada provozů se spoluspalováním biomasy a dalších alternativních paliv nemá zkušenosti. Součástí této práce je tvorba nástroje pro energetické a ekonomické vyhodnocení provozů využívajících biomasu jako palivo. Tento nástroj optimalizuje provoz zařízení tak, aby bylo dosaženo maximálního zisku. Může tak poskytnout podporu např. při rozhodování o ekonomické výhodnosti energetického využití různých druhů biomasy.

Pokročilé simulační a optimalizační nástroje mohou výrazně napomoci efektivním řešením v předmětné oblasti. Základem k těmto výpočtům je matematický popis systému, tedy jeho model. V následující kapitole jsou stručně popsány metody a přístupy matematického modelování, simulace a optimalizace zejména pro energetické systémy, ale i pro další odvětví procesního průmyslu. Dále je navržena metodika postupu vytváření simulačních a optimalizačních modelů, která je detailněji rozebrána a prezentována na dvou případových studiích.



## 2. TEORETICKÉ ZÁKLADY POUŽITÝCH METOD

V této kapitole jsou stručně popsány teoretické základy z oblasti modelování, simulace a optimalizace. Na těchto třech disciplínách je postavena praktická část disertační práce. Modelování tvoří základ pro simulační i optimalizační výpočty. Proto je mu věnována první část kapitoly. Další část popisuje možnosti přístupů k simulačním výpočtům a je zde také uveden stručný popis simulačního softwaru W2E, který je vyvíjen na pracovišti autora. Poslední část je pak věnována stručným základům matematické optimalizace a jejímu využití v oblasti energetiky.

### 2.1 Modelování energetických zdrojů

Počítačové modely procesů jsou v současnosti jedním z nejrozšířenějších podpůrných prostředků při řešení jednoduchých i komplexních problémů. Díky nim lze simulovat proces a získat tak důležité informace. Počítačová simulace umožňuje analyzovat velmi rozsáhlé systémy a tím získat důležité informace při řešení různých problémů. Simulační programy obsahují řadu hotových modelů pro standardní procesy, databáze fyzikálně-chemických dat, atd. Ještě vyšší úroveň výpočtů než samotné simulace představují optimalizační výpočty, kdy se hledá nastavení určitých parametrů zkoumaného systému tak, aby bylo dosaženo minimální (nebo maximální) hodnoty zvoleného kritéria.

V literatuře [36] je model popsán jako reprezentant nějakého konkrétního systému nebo objektu. Zůstávají zachovány pouze důležité vlastnosti originálu, které jsou vhodně popsány. Pro počítačovou simulaci jsou důležité především matematické modely. Počítačová simulace je v podstatě experimentování s počítačovým modelem, které umožňuje zkoumat vlastnosti a podávat informace o reálném systému. V případě procesů může být chápána jako zobecněná forma bilančních výpočtů, které jsou ve většině případů založeny na zákonech o zachování energie a hmoty.

Při návrhu modelu reálného systému je důležitý návrh jednotkových operací, topologie systému a fyzikálně-chemický popis. Jednotkovou operaci si lze představit jako uzel, do něhož vstupují a z nějž vystupují technologické proudy. Na těchto uzlech je provedena hmotnostní a energetická bilance a je případně aplikován termodynamický princip operace. Topologie systému udává to, jakým způsobem jsou jednotkové operace propojeny. Oproti realitě je topologie modelu zredukována o potrubní větve a aparáty pracující při výjimečných stavech (např. pro najíždění a odstavování výroby). Do topologie musí být zahrnuty i proudy, které nemají svůj protějšek v reálném potrubí a představují tepelné proudy, konanou práci či čistě energetické proudy [36]. Jednotlivé složky a směsi pak musí být dostatečně popsány a to jak z fyzikálního, tak i chemického hlediska.

Ze zkušeností autora vyplývá, že k modelování energetických systémů lze přistoupit dvěma způsoby. Podle povahy problému lze využít:

- modelování na základě bilancí a jednoduchých termodynamických modelů
- modelování na základě provozních dat

Modelování na základě provozních dat je možné jen v případě již existujících provozů. Pokud jsou data z provozu nedostupná, nebo jde-li o modelování neexistujícího energetického zdroje, použije se přístup založený na termodynamických modelech. Většinou platí, že modely, vycházející z provozních dat, jsou přesnější než obecné modely. A proto, pokud je to možné, je jejich použití vhodnější. Oba dva přístupy lze samozřejmě kombinovat; např. při modelování existujícího energetického zdroje (provozní data k dispozici), ve kterém je instalováno nové zařízení (žádná provozní data).

### 2.1.1 *MODELOVÁNÍ S VYUŽITÍM BILANCÍ A TERMODYNAMICKÝCH MODELŮ*

Bilance představují jednu z nejdůležitějších aktivit při návrhu procesu. Modely vycházejí především z energetických a hmotnostních bilancí. Bilanční uzly, které se používají v předmětné oblasti předkládané práce, lze rozdělit do dvou skupin (výčty nejsou úplné) [37]:

- Základní operace
  - směšování plynu
  - spalování plynného paliva
  - spalování tuhého a kapalného paliva
  - ohřev resp. chlazení.
- Jednoduché termodynamické modely energetických zařízení a tepelných strojů jako jsou např.:
  - parní kotel
  - kotel na odpadní teplo
  - parní turbína
  - plynová turbína.

Uzly jsou vzájemně propojeny technologickými proudy a tím je vytvořen model celého systému. V systémech využití energie spalín lze identifikovat následující hlavní technologické proudy:

- voda resp. pára (chladicí voda, napájecí voda, sytá kapalina, mokrá a přehřátá pára)
- plynná směs (vzduch, spaliny, plynná paliva, odpadní plyny z výroby)
- tuhá látka (pevný odpad, struska, popel, biomasa, sorbenty).

Nejpoužívanějšími aparáty v předmětné oblasti jsou parní kotle a parní turbíny. Proto je těmto zařízením věnována větší pozornost. Důležité je najít vhodný popis zařízení tak, aby byl pro dané účely dostatečně přesný, ale zároveň aby stále umožňoval dobrou řešitelnost úlohy. V literatuře existuje více modelů těchto zařízení a modely těchto aparátů lze rozdělit na dvě kategorie. První kategorií jsou modely uvažující konstantní účinnost, jejichž přehled lze nalézt v [37] nebo [38]. Ve skutečnosti je účinnost závislá na více faktorech, především na zatížení. Tuto skutečnost zohledňuje druhá kategorie modelů.

V literatuře lze nalézt několik obecných modelů parních kotlů, které zohledňují velikost kotle, tlakové parametry a aktuální zatížení. Shang se ve své práci [39] zabývá modelem kotle, jehož účinnost při částečném zatížení vychází z kotlových ztrát, kde mezi hlavní patří komínové ztráty, ztráty odkalem a ztráty sáláním tepla přes stěny kotle do okolí. Jde vlastně o model napůl empirický, protože ztráty jsou do modelu implementovány na základě dat publikovaných Pattisonem a Sharmou [40], která představují typické kotlové ztráty při částečném zatížení. Je potřeba zdůraznit, že jde o typické hodnoty. Ve skutečnosti tyto ztráty závisí na samotném návrhu kotle, jeho provozu a údržbě, atd. Shangův model o něco později upravil Varbanov v práci [41]. V jeho modelu je možné počítat ztráty odkalem zvlášť.

Stejně jako v případě parních kotlů, tak i v případě parních turbín existuje více modelů. Mavromatis ve své práci [42] představuje model protitlakové parní turbíny s účinností proměnlivou podle aktuálního zatížení turbíny.

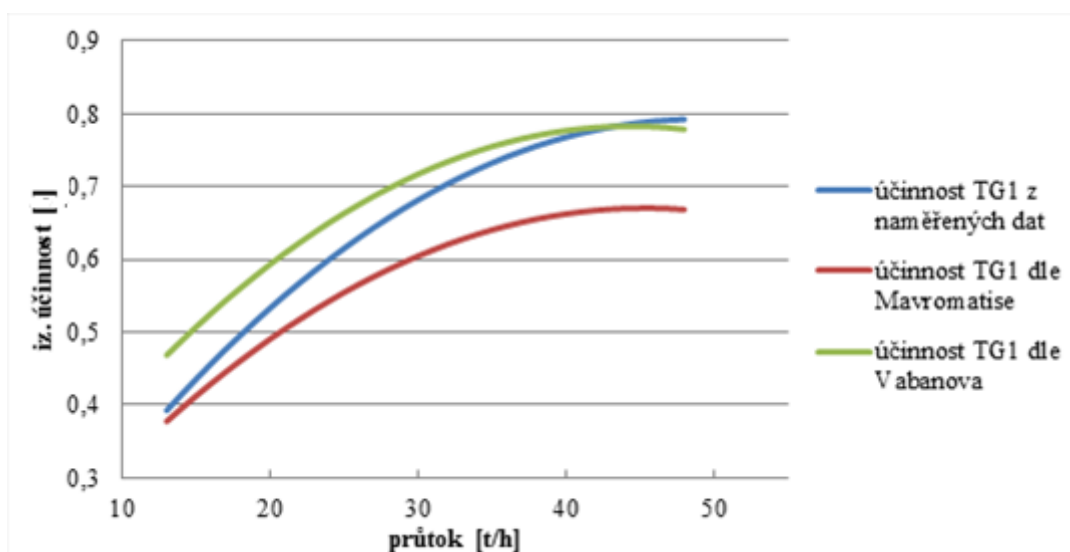
Od tohoto modelu odvodil později Shang v práci [43] model kondenzační turbíny. Model je založen na principu Willanovy přímky, která poskytuje lineární vztah mezi průtokem páry a výkonem parní turbíny. Každý bod na Willanově přímce představuje poměr průtoku páry k výkonu parní turbíny a udává izoentropickou účinnost parní turbíny.

Ze zkušeností z provozů je známo, že méně zatížené parní turbíny mají menší účinnost než parní turbíny, které pracují při vyšším zatížení, a závislost izoentropické účinnosti parní turbíny k jejímu výkonu není lineární. Ve Willanově přímce je tato nelinearita integrována lineární závislostí, což je velice důležité pro modelování turbíny.

Tento model byl dále upraven Varbanovem [44],[45] a [41]. Varbanov při tom vychází z Moliérova diagramu. Model parní turbíny je taktéž napůl empirický, protože účinnost je implementována na základě reálných dat. Pro zajímavost je uvedeno srovnání Varbanovova a Mavromatisova modelu s reálnými daty z provozu parní protitlakové turbíny v zařízení na energetické využití odpadů (v obr. 11 označeno jako TG1) o parametrech:

- nominální průtok páry: 48 t/h
- vstupní/výstupní tlak páry: 41/9,5 bar
- vstupní teplota páry: 400 °C

Je zřejmé, že Varbanovův model lépe odpovídá skutečnosti (alespoň v tomto případě).



Obr. 11 Srovnání modelů turbín s reálnými daty

Další model, který lze v literatuře nalézt, je popsán v práci [46]. Ten využívá některé vlastnosti modelu Mavromatise a při srovnání tohoto modelu s modely Mavromatise a Varbanova na třech turbínách s různými parametry se jeví prezentovaný model jako nejpřesnější. Další model je představen v práci [47]. Tento model lze aplikovat na odběrové parní turbíny s regulovaným i neregulovaným odběrem.

Složitější nelineární modely mohou popisovat zařízení přesněji než jednoduché lineární modely, které jsou ale na druhou stranu vhodnější např. pro účely optimalizace. Obecně jsou totiž lineární problémy lépe řešitelné, než ty nelineární.

### 2.1.2 MODELOVÁNÍ NA ZÁKLADĚ PROVOZNÍCH DAT

Důležitou fází při vytváření modelu na základě provozních dat je jejich důkladná analýza. Podle potřeby je použito jednorozměrných nebo vícerozměrných statistických metod.

Model je tak kvalitní, jak kvalitní jsou data, na kterých je postaven. Ověření správnosti dat, tj. ověření zda odpovídají přírodním zákonům, provozní zkušenosti, apod., je tedy velice důležité. Pokud data vykazují v tomto směru chyby, je možné použít metodu

vyrovnání dat. Cílem je úprava naměřených dat tak, aby se co nejvíce blížila správným hodnotám. Při použití těchto metod lze také detekovat hrubé chyby v měření.

K posuzování dat se často používají diagnostické grafy, s jejichž pomocí lze získat základní informace o povaze dat. Na jejich základě pak rozhodujeme o dalším postupu, použití metod, atd.

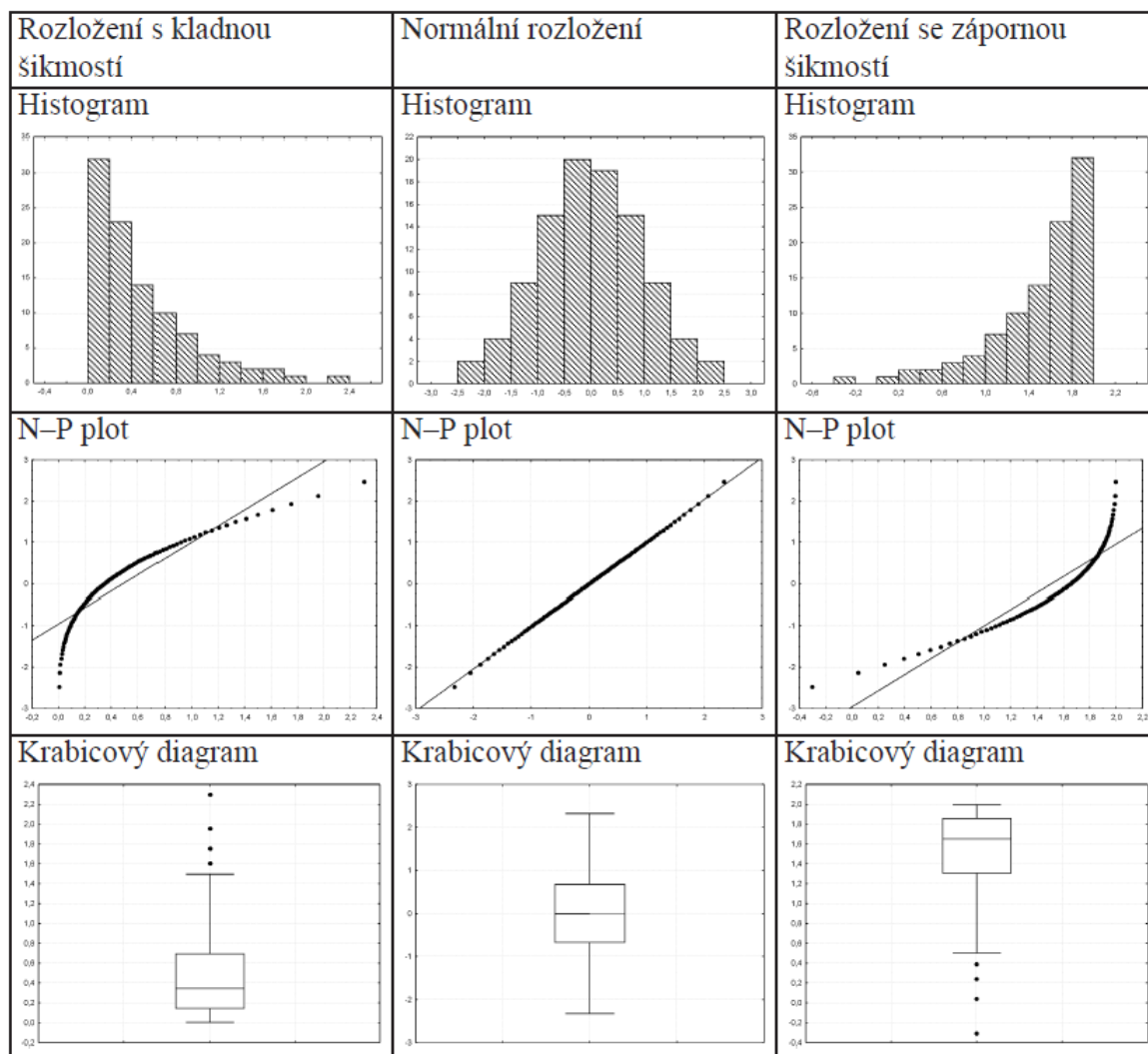
Mezi velmi často používané patří krabicový graf, který umožňuje posoudit symetrii a variabilitu datového souboru a existenci odlehlých či extrémních hodnot. Odlehlé hodnoty lze identifikovat, jak již bylo zmíněno, i při vyrovnávání dat nebo různými testy (např. Grubsov test). Odlehlé a extrémní hodnoty jsou většinou způsobené např. chybným měřením (porucha měřicího přístroje), měřením za výjimečných stavů, např. odstávka, najíždění. Tyto hodnoty mohou ovlivňovat další zpracování dat, na jehož výsledcích je model sestaven [48]. Je ovšem potřeba vyhodnotit, zda se skutečně jedná o chybný záznam, protože odlehlá měření nejsou automaticky chybná.

Dalším základním grafem je histogram. Ten slouží jako nejjednodušší odhad hustoty rozložení. Lze též porovnat tvar hustoty četnosti s tvarem hustoty pravděpodobnosti vybraného teoretického rozložení. Graf se konstruuje tak, že na osu  $x$  se vynášejí třídící intervaly a na osu  $y$  odpovídající četnosti [48].

Mnoho statistických metod vyžaduje normalitu dat. Normální pravděpodobnostní graf (normal probability plot – N-P plot) umožňuje posoudit, zda datový soubor pochází z normálního rozložení. Graf je konstruován tak, že na osu  $x$  se vynášejí uspořádané hodnoty datového souboru  $x_{(1)} \leq \dots \leq x_{(n)}$ , kde  $n$  je rozsah souboru, a na osu  $y$  kvantily  $u_{\alpha_j}$ , kde  $\alpha_j = 3j - 1/3n + 1$ , přičemž  $j$  je pořadí  $j$ -té uspořádané hodnoty. Pocházejí-li data z normálního rozdělení, pak všechny dvojice  $(x_{(j)}, u_{\alpha_j})$  budou ležet v přímce [48]. Graf lze doplnit o některý z testů normality, např. test dobré shody, nebo Shapirův-Willkův test. Ilustrativní příklady zmíněných grafů a jejich interpretace vzhledem k normalitě dat je na obr. 12.

V některých situacích může být užitečné také testování shody středních hodnot dvou a více souborů. Toto umožňuje analýza rozptylu (ANOVA). ANOVA je metodou matematické statistiky, která zkoumá vliv jednoho nebo více faktorů na sledovanou veličinu tak, že porovnává střední hodnoty pro jednotlivé úrovně faktoru. Jedná se o parametrickou metodu, proto musí být splněn předpoklad, že data pocházejí z normálních rozdělení. ANOVA není citlivá na mírné porušení této podmínky, zvláště pokud mají všechny výběry rozsah počtu pozorování nad 30 (důsledek tzv. centrální limitní věty). Dalším předpokladem pro ANOVA je homogenita rozptylů. V případě většího porušení normality či v případě nehomogenních rozptylů se doporučuje provést Kruskal-Wallisův test (K-W test), což je neparametrická obdoba ANOVA (testují se mediány) [48].

Při modelování na základě provozních dat se využívá regresní analýza. Regresní analýza je soubor technik matematické statistiky, používaných při vytváření modelů. Jde o to zjistit, jak kvantitativní závislá veličina (závislá proměnná) závisí na jedné nebo více kvantitativních nezávislých veličinách (nezávislé proměnné). Matematický vztah mezi závisle proměnou a nezávislými proměnnými je v regresní analýze označován jako regresní funkce a je dán vztahem  $y = \varphi(\mathbf{x}, \boldsymbol{\beta})$ , kde  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$  je vektor nezávisle proměnných,  $y$  je závisle proměnná a  $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \dots, \beta_m)$  je vektor regresních koeficientů. Právě odhady regresních koeficientů patří k nejdůležitějším krokům regresní analýzy. Mezi nejpoužívanější metody pro odhad regresních koeficientů patří metoda nejmenších čtverců (MNČ). Metoda je založena na principu minimalizace tzv. reziduálního součtu čtverců, jinými slovy jde o to, aby byl součet čtverců odchylek jejích funkčních hodnot od daných naměřených hodnot co nejmenší. MNČ je založena na splnění několika předpokladů,



Obr. 12 Diagnostické grafy pro různé datové soubory [48]

zejména na předpokladu o normálně rozložených reziduích se střední hodnotou 0, homoskedasticitě, nekorelovanosti nezávislých veličin a normalitě veličin. Dále je součástí regresní analýzy také testování významnosti modelu jako celku (F-test) a testování významnosti jednotlivých regresních koeficientů (t-testy). K posouzení kvality navržené regresní závislosti slouží různá kritéria, např. index determinace. Ten udává, z kolika procent vysvětluje variabilita nezávislé proměnné variabilitu závislé proměnné.

Existují dva typy regrese:

- lineární regrese
- nelineární regrese

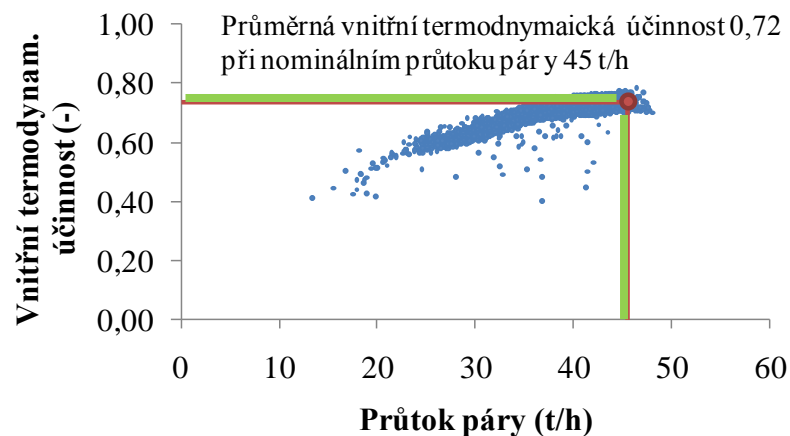
Linearita se posuzuje vzhledem k regresním koeficientům. Lineární regresní funkce je např. funkce ve tvaru  $y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2^2$ , zatímco nelineární regresní funkce je např. tvaru  $y = \beta_1 + \exp(\beta_2 \cdot x)$ .

Sestavení modelu pak probíhá stejným způsobem jako u bilančního modelování s tím rozdílem, že uzly nejsou popsány rovnicemi hmotnostních a energetických bilancí, ale funkcemi, které jsou výsledkem regresní analýzy.

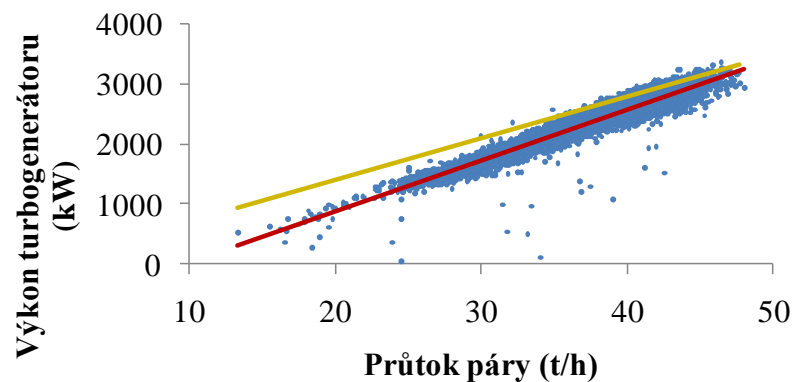
Vytváření modelu lze shrnout do posloupnosti těchto kroků:

- Identifikace a odstranění odlehlých hodnot pomocí krabicového grafu, histogramu a bodového grafu
- Posouzení normality pomocí pravděpodobnostního grafu, doplněného o test normality
- Návrh vhodného tvaru regresní funkce, výpočet regresních koeficientů a testování významnosti
- Ověření předpokladů MNČ

Na příkladu protitlaké parní turbíny s výrobou elektřiny na generátoru je porovnán jednoduchý bilanční model s fixní termodynamickou účinností a regresní model. Data jsou získána z provozu spalovny komunálních odpadů TERMIZO. Hodnota vnitřní termodynamické účinnosti parní turbíny byla zvolena jako průměrná hodnota pro nominální průtok páry, viz obr. 13 a). Z obr. 13 b) je zřejmé, že regresní model vystihuje skutečnou výrobu elektřiny lépe než jednoduchý termodynamický model, protože zohledňuje proměnnou účinnost. Detailněji se modelem parní turbíny v provozu TERMIZO zabývá kapitola 4.3.3.



(a)



• Naměřené — Regresní model — Termodynam. model

(b)

Obr. 13 Srovnání způsobů modelování: a) určení fixní vnitřní termodynamické účinnosti parní turbíny, b) porovnání regresního a termodynamického modelu

## 2.2 Počítačová simulace energetických zdrojů

Simulační výpočty jsou nepostradatelným podpůrným nástrojem při rozhodování ve fázi návrhu, rozšíření nebo modifikaci energetických systémů. Pomocí simulačních modelů lze sledovat chování systému v závislosti na nastavení různých parametrů. Stejně tak lze simulaci využít při rutinním provozu, kdy může přispět k vyhodnocení nejvýhodnějšího provozního stavu.

### 2.2.1 SIMULAČNÍ PŘÍSTUPY

Pro simulaci procesů, postavených na hmotnostních a energetických bilancích, se využívá hlavně těchto dvou přístupů [49]:

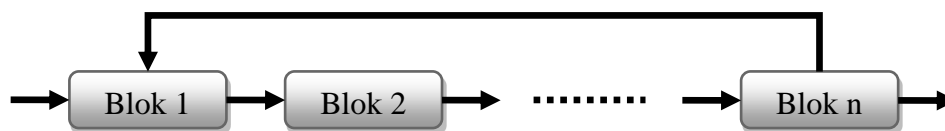
- sekvenčně modulární
- rovnicově-orientovaný

Sekvenčně modulární simulace je jednodušší z obou metod pro řešení simulačních úloh. Je intuitivní a jednodušeji implementovatelná do softwarových aplikací. Jejím základním principem je sestavení rovnic, popisujících transformaci vstupů na výstupy pro každý uzel, a jejich vyřešení. Výpočet probíhá postupně na každém uzlu ve stanoveném pořadí.

Nevýhodou tohoto přístupu je, že umožňuje výpočet pouze ve směru procesu, což má za následek obtížné hledání hodnot vstupních parametrů (ve smyslu směru reálného procesu) pro požadované hodnoty výstupních parametrů. Tedy sekvenčně modulárním přístupem nelze spočítat např. množství dávkovaného paliva do kotle pro požadované množství elektrické energie vyrobené na turbíně.

Dalším problémem je výpočet schématu obsahujícího zpětné proudy, tzv. recykly. Ty se vyskytují např. při modelování provozů spaloven komunálního odpadu v důsledku tzv. recirkulace spalin. Část spalin je po průchodu elektrofiltrem vedena zpět do prostoru spalovací komory. Tím se zvyšuje účinnost kotle a zároveň snižuje tvorba oxidů dusíku  $\text{NO}_x$ .

Jelikož jsou vstupní hodnoty pro blok s přívodem recyklu dopočítávány až v některém z následujících bloků tak, jak je znázorněno na obr. 14, je nutné řešit recykl pomocí iterace. K tomu se dá využít jednoduchý algoritmus metody postupných aproximací [36], který spočívá v konstrukci iterační posloupnosti  $x_{n+1} = f(x_n)$ . Praxe ukazuje, že tato metoda je téměř ve všech případech úspěšná. Proces je opakován tak dlouho, dokud se hodnoty  $x_n$  a  $x_{n+1}$  neshodují se stanovenou odchylkou.



Obr. 14 Znáznornění recyklu ve schématu

Nedostatky sekvenčně modulárního přístupu odstraňuje rovnicově orientovaný přístup. V tomto případě se neřeší každý uzel zvlášť v určeném pořadí, ale všechny uzly jsou řešeny zároveň. Modelové rovnice ve tvaru nelineárních algebraických rovnic pak tvoří soustavu, která se řeší vhodnými numerickými metodami. To také odstraňuje nutnost použití iteračního výpočtu v případě schémat s recyklem. Implementace rovnicového přístupu do softwarových aplikací je náročnější jak z hlediska generování systému rovnic,

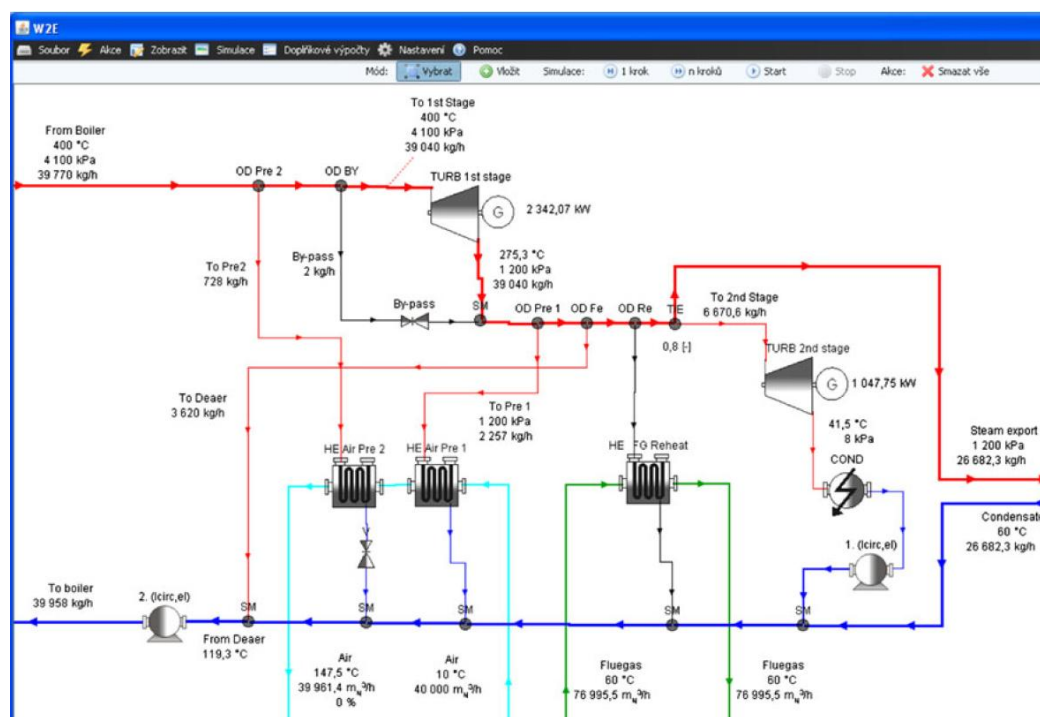
tak z pohledu řešení. Avšak, jak je naznačeno v následujících kapitolách, jeho využití pro účely následné optimalizace systému je nezbytné.

### 2.2.2 SIMULAČNÍ SYSTÉM W2E

Potřeba řešit specifické úlohy pro konkrétní zařízení byla impulsem k vytvoření vlastního softwarového produktu pro výpočet hmotnostních a energetických bilancí technologických linek v oblasti energetického využití odpadů a biomasy. Pracovní název produktu je W2E (waste-to-energy). Cílem bylo vytvořit nástroj, který je možné přizpůsobovat specifickým požadavkům a implementovat do něj další funkce usnadňující řešení problémů z cílové oblasti. W2E je programován v jazyce JAVA a jeho architektura je navržena tak, aby jej bylo možné snadno rozšiřovat o další modely technologických bloků a proudů.

Vývoj probíhá na pracovišti Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Autor se na vývoji softwaru podílí implementací nových modelů technologických bloků a proudů a případnou úpravou těch stávajících. Program W2E slouží jako podpora výzkumu, konkrétně pro simulaci obecných schémat, a dále poskytuje základ pro tvorbu jednoúčelových aplikací. Tyto aplikace lze vytvořit tak, aby co nejlépe popisovaly skutečný proces. Navíc je možné jednoúčelové aplikace rozšířit o ekonomické parametry a získat tak technicko-ekonomický model. Rovněž formu a obsah výstupů lze upravit podle specifických požadavků. O softwaru se zmiňuje přehledový článek [50] a software je přímo využit v práci [51] nebo [52] a v celé řadě dalších případových studiích.

Hlavní okno programu (obr. 15) tvoří menu, kreslicí plátno a editační panel. Volby v menu slouží převážně k nastavení aplikace. Na kreslicí plátno se umísťují bloky, které se propojují proudy, čímž vznikne schéma technologické linky. Editační panel slouží k zadávání parametrů vstupních proudů a parametrů bloků. Zobrazují se zde i výsledky výpočtu. Hodnoty parametrů lze sledovat také přímo na kreslicím plátně v tzv. sledovacích tabulkách, které jsou připojeny jak k proudům tak k blokům.



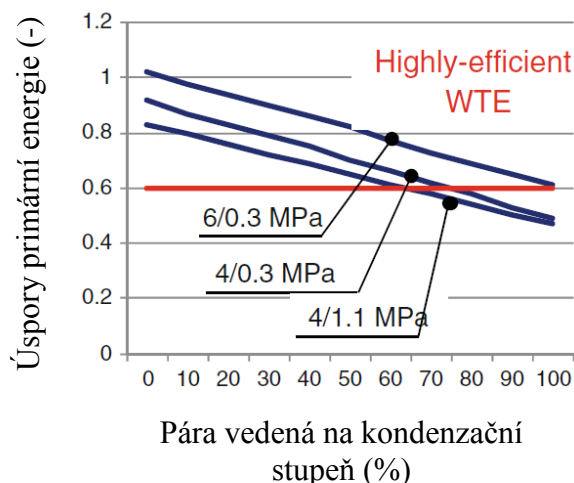
Obr. 15 Technologické schéma generované ve W2E – systém využití páry v zařízení EVO



Jak již bylo zmíněno, W2E lze velice dobře přizpůsobovat různým potřebám. Díky tomu je W2E rozšiřováno o nové výpočtové moduly, které urychlují práci. Příkladem je formulář pro výpočet účinnosti využití energie v provozech termického zpracování odpadů (obr. 16). Příklad výpočtů pomocí tohoto modulu lze nalézt v [53]. Jde o hodnocení zařízení ZEVO s různými tlaky páry na vstupu a výstupu z kotle (viz obr. 17), jehož systém využití páry je na obr. 15. Hodnotícím kritériem je úspora primárních zdrojů (primary energy savings [54]). Obrázek pak ukazuje změnu kritéria v závislosti na množství páry vedené na kondenzaci (označeno jako TURB 2nd stage v obr. 15) pro různé parametry páry. Zvýrazněná hodnota 0,6 pak udává mez pro vysoce účinné zařízení EVO.

	GJ/rok	Koeficient	Přepočteno na energii primárních zdrojů
<b>E<sub>w</sub> Energie vnesená odpadem</b>	1 635 000	-	1 635 000
<b>E<sub>f</sub> Energie dodaná přidavným palivem,</b> <b>podílející se na výrobě páry</b>	3 220	-	3 220
<b>I<sub>circ</sub> Cirkulující energie</b>	213 977,59		302 823,26
I <sub>circ,el</sub> z toho elektrická	44 160	2,63158	116 210,53
I <sub>circ,th</sub> z toho tepelná	169 817,59	1,0989	186 612,74
<b>Q<sub>exp</sub> Exportovaná energie</b>	317 794,09		836 271,17
Q <sub>exp,el</sub> z toho elektrická	317 775,13	2,63158	836 250,34
Q <sub>exp,th</sub> z toho tepelná	18,96	1,0989	20,84
<b>Q<sub>prod</sub> Produkovaná energie</b>	531 771,68		1 139 094,44
Q <sub>prod,el</sub> z toho elektrická	361 935,13	2,63158	952 460,86
Q <sub>prod,th</sub> z toho tepelná	169 836,55	1,0989	186 633,57
<b>I<sub>imp</sub> Importovaná energie</b>	9 040		15 819,55
I <sub>imp,el</sub> z toho elektrická	3 840	2,63158	10 105,26
I <sub>imp,th</sub> z toho tepelná	5 200	1,0989	5 714,29
I <sub>imp,f</sub> z toho v palivu	0	-	0

Obr. 16 Formulář kritérií pro hodnocení zařízení EVO



Obr. 17 Hodnota úspor primární energie pro různé provozní režimy [53]

V současné fázi vývoje je software W2E určen pouze pro řešení bilancí. Do budoucna by měl být rozšířen o návrhové výpočty týkající se konkrétního uzlu, které navazují na bilanční výpočty. Jako příklad lze uvést návrh optimálního tvaru aparátu, určení hmotnosti a odhad ceny.

W2E využívá sekvenčně modulárního přístupu simulace. Zejména z důvodu dalšího využití softwarového systému pro účely optimalizace se však uvažuje o přechodu na rovnicově orientovaný přístup. Vygenerovaný systém rovnic, popisujících technologickou linku, by bylo možné transformovat do jazyka některého z modelovacích prostředí s podporou optimalizačních řešičů, např. GAMS, AIMMS. Toto je podnětem pro další vývoj softwarového systému.

Je třeba poznamenat, že pro oblast procesního inženýrství existuje celá řada profesionálních simulačních nástrojů. Software W2E je ale pro pracoviště autora cenný z toho důvodu, že poskytuje možnost úprav podle vlastních specifických požadavků.

## 2.3 Optimalizace a její použití v oblasti energetických zdrojů

Dizertační práce je zaměřena na technicko-ekonomické optimalizace energetických provozů využívajících (nejen) biomasu a odpad. V této oblasti se lze často setkat s optimalizací konfigurace (struktury) systému a plánováním provozu. Jak návrh konfigurace, tak plánování provozu energetických zdrojů, nejen těch využívajících biomasu a tuhý komunální odpad jako palivo, představují rozhodovací proces. Z možných řešení je potřeba vybrat to, které nejlépe vyhovuje daným požadavkům. K tomu lze využít různých metod.

Velmi často se využívá metod operačního výzkumu. Termínem operační výzkum se označuje odvětví aplikované matematiky, využívající matematické modelování, statistiku a další matematické disciplíny k nalezení optimálního řešení složitých problémů. Jednou z rozšířených metod operačního výzkumu je matematická optimalizace (matematické programování). Cílem optimalizace je efektivním a rychlým způsobem najít nejlepší řešení vzhledem k nějakému kritériu z množiny tisíců až milionů přípustných řešení. Typicky jde o minimalizaci nákladů nebo maximalizaci zisku, apod.

Postup při řešení problému metodami matematického programování se dá shrnout do několika kroků:

### 1. Vytvoření matematického modelu systému a příprava dat

- stanovení cíle, tj. určení účelové funkce, která je kritériem pro výběr optimálního řešení
- popis procesů ovlivňujících hodnotu účelové funkce
- popis činitelů, které ovlivňují procesy
- popis vztahů mezi činiteli, procesy a účelovou funkcí (omezení)

### 2. Řešení úlohy – nalezení optimálního řešení

### 3. Interpretace řešení.

Mezi běžně používané metody patří lineární programování (LP), nelineární programování (NLP), celočíselné lineární programování (MILP) a celočíselné nelineární programování (MINLP). U lineárních metod jsou jak účelová funkce, tak všechna omezení lineární, zatímco u metod nelineárních je nelineární buď účelová funkce nebo alespoň jedno z omezení nebo oboje. Pokud mluvíme navíc o celočíselných metodách, pak je alespoň jedna proměnná celočíselná. Ve srovnání s nelineárními úlohami jsou lineární snadněji řešitelné a garantují nalezení globálního optima, jelikož lineární omezení tvoří konvexní množinu přípustných řešení. Pokud se v modelu navíc vyskytuje náhodnost, problém se řeší metodami stochastického programování (SP).

Zdroj [55] uvádí tři základní typy úloh řešených v oblasti energetických zdrojů:

- plánování provozu zdroje,
- návrh nového zdroje,
- modernizace existujícího zdroje.

V úlohách optimalizace provozu energetického zdroje je jeho struktura neměnná. Prostor pro optimalizaci tedy poskytují pouze provozní parametry. Optimalizovat lze různé provozní stavy např. rozdílné požadavky na dodávky energií, najíždění, odstávku, atd. V úlohách modernizace existujícího zdroje je kromě provozních parametrů prostor pro částečné změny ve struktuře systému. Je nutné určit velikosti a typy nových zařízení, která mají být instalována, a dále jejich počet a propojení v rámci stávajícího systému. Při návrhu nového zdroje jde o optimální návrh celé struktury systému i provozních parametrů. Ačkoliv požadavků na vstupní data není tolik jak při modernizaci existujícího zdroje, je obecně počet proměnných a omezení vyšší v důsledku větších možností nových zařízení pro celý systém. Princip řešení úloh týkajících se struktury spočívá ve výběru zařízení z několika možných typů nebo uspořádání (v anglicky psaných pracích označováno jako “superstructure” [55]). Výběr je popsán pomocí binárních proměnných (tedy nabývajících hodnot z množiny  $\{0,1\}$ ), kdy 1 znamená, že zařízení je vybráno, a 0 opak. Použití binárních proměnných znamená nutnost řešit tyto problémy celočíselnými metodami. Binární proměnné se vyskytují také v plánování provozu, kde mohou určovat, zda je dané zařízení v provozu či nikoliv.

Úlohy optimalizace v oblasti energetických zdrojů řeší také plánování pro různé časové horizonty. Lze je dělit na:

- krátkodobé,
- střednědobé,
- dlouhodobé.

Krátkodobé plánování uvažuje s časovým horizontem několika dnů a s časovým krokem jedna hodina nebo kratším. V úloze jde o to určit např. okamžitý průtok paliva, výkon kotle, turbín, apod. Jedná se tedy o detailní plán provozu. Střednědobé plánování uvažuje obvykle časový horizont jednoho roku s časovým krokem jeden měsíc, jeden

týden, apod. Účelem těchto plánů je např. odhad využití paliv během roku. Dlouhodobé plánování uvažuje časový horizont několika let. Jedná se především o plánování investic s delší návratností, např. instalace nového kotle, nové turbíny. Zde se většinou využívá stochastického programování, které umožňuje zahrnout do modelu neurčitost např. v podobě vývoje podstatných parametrů v budoucnosti.

### 2.3.1 MATEMATICKÉ PROGRAMOVÁNÍ

Funkci  $f : R^n \rightarrow R$ , označíme jako účelovou funkci. V minimalizační (resp. maximalizační) úloze hledáme řešení  $\mathbf{x}_{opt}$ , které odpovídá podmínce  $\mathbf{x}_{opt} \in C$ , kde  $C \subset R^n$  a pro všechna  $\mathbf{x} \in C$  platí, že  $f(\mathbf{x}_{opt}) \leq f(\mathbf{x})$  (resp.  $f(\mathbf{x}_{opt}) \geq f(\mathbf{x})$ ). Množinu  $C$  označíme jako množinu přípustných řešení. Tuto množinu získáme díky zadaným omezením, které v prostoru  $R^n$  tuto množinu vymezí. Obecně lze minimalizační úlohu zapsat ve tvaru:

$$\begin{aligned} & \min f(\mathbf{x}) \\ & \text{za podmíněk } g_i(\mathbf{x}) \circ 0, i = 1, 2, \dots, n \\ & \mathbf{x} \in C \end{aligned}$$

kde funkce  $g_i : R^n \rightarrow R$  jsou omezení neboli podmínky a  $\circ \in \{\leq, =, \geq\}$ . Maximalizační úlohu lze převést na minimalizační transformací účelové funkce. Úlohu matematického programování, kde jsou všechny parametry zcela známé lze zapsat takto:

$$\begin{aligned} & \min f(\mathbf{x}, \mathbf{a}) \\ & \text{za podmíněk } \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{a}) \leq 0, \\ & \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{a}) = 0, \\ & \mathbf{x} \in C \end{aligned}$$

kde  $\mathbf{a} \in R^k$  je  $k$ -dimenzionální vektor konstant.

Jak již bylo naznačeno, v praktických problémech se vyskytují také náhodné parametry. Při řešení problémů, obsahujících takové parametry, mohou být použity odlišné přístupy. Jedním z nich je SP, ve kterém jsou náhodné parametry modelovány generováním realizací náhodných veličin. Obecně lze úlohu stochastického programování zapsat ve tvaru:

$$\begin{aligned} & \min f(\mathbf{x}, \xi) \\ & \text{za podmíněk } \mathbf{g}(\mathbf{x}, \xi) \leq 0, \\ & \mathbf{h}(\mathbf{x}, \xi) = 0, \\ & \mathbf{x} \in C(\xi) \end{aligned}$$

kde  $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_k)^T$  je konečně rozměrný vektor náhodných veličin. Pro výběr způsobu řešení této úlohy je potřeba vědět, ve kterém okamžiku bude provedeno rozhodnutí. Existují dvě varianty: buď se rozhoduje před tím, než jsou známé realizace náhodných veličin, nebo rozhodnutí padne až po realizaci náhodné veličiny. Podle toho pak použijeme přístup „Here and now“ (HN přístup) nebo „Wait and see“ (WS přístup). WS přístup využíváme v případě, že náhodný parametr  $\xi$  je již známý, a my můžeme s touto znalostí při rozhodování o  $\mathbf{x}$  pracovat. V této chvíli je rozhodnutí funkcí náhodného parametru, tedy  $\mathbf{x}(\xi)$ . U HN přístupu provádíme rozhodnutí o  $\mathbf{x}$  bez znalostí budoucí realizace náhodného parametru. To znamená, že  $\mathbf{x}$  je stejné pro všechny realizace  $\xi$ .

Kombinaci těchto přístupů lze aplikovat na dvoustupňové úlohy. To jsou úlohy, kdy rozhodnutí v prvním stupni je podle HN přístupu (neznámé realizace náhodných veličin) a rozhodnutí ve druhém stupni je podle WS přístupu (reakce na realizaci náhodných veličin). Příkladem takové úlohy může být např. rozhodnutí o parametrech nově budovaného energetického zdroje (první stupeň) a o provozu zdroje podle poptávky po energii (druhý stupeň). Dvoustupňové úlohy lze samozřejmě rozšířit na více stupňové. Problematika stochastického programování je přehledně uvedena v [56] a [57].

### **2.3.2 VYUŽITÍ MATEMATICKÉ OPTIMALIZACE PŘI NÁVRHU A PLÁNOVÁNÍ PROVOZU ENERGETICKÝCH ZDROJŮ**

Optimalizací energetických zdrojů se zabývá celá řada vědeckých prací. Většinou jde o optimalizaci provozu a struktury systému s využitím bilančních modelů. Úloha je typicky formulována jako minimalizace nákladů na provoz nebo maximalizace zisku.

Práce [58] se zabývá návrhem a provozem kogeneračního systému pro nemocnici a menší obytnou zástavbu. Optimalizace návrhu vychází ze superstruktury, kde je výroba energií zajištěna na kogenerační jednotce na bázi spalovacích motorů o elektrickém výkonu 0,97 až 1,29 MW a tepelném výkonu 1,16 až 1,55 MW. Optimalizace provozu vychází z požadavků na množství dodávané elektřiny a tepla. Cílem je minimalizace provozních nákladů, do kterých jsou zahrnuty jak náklady fixní (mzdové náklady, pravidelná údržba), tak proměnné (v závislosti na zatížení). Model jednotky je lineární a obsahuje binární proměnné reprezentující sepnutí/odstavení zařízení. Jde tudíž o MILP problém.

V práci [59] je řešen problém optimálního kogeneračního systému pro šest větších budov (radnice, nemocnice, škola, atd.). Výroba energií je zajištěna spalovacími mikroturbínami (uvnitř některých budov) o kapacitě 125 až 210 kW a centrálním systémem s kogenerační jednotkou na bázi spalovacích motorů o kapacitě 840 až 1545 kW. Cílem je minimalizace ročních nákladů na provoz. Součástí je i návrh sítě vytápění a navíc jsou hodnoceny úspory primární energie a emisí CO<sub>2</sub>.

Návrh trigenerační jednotky, která zajišťuje teplo, elektřinu a chlad, a minimalizace celkových ročních nákladů na její provoz lze najít v práci [60]. Jde o jednotku zajišťující dodávky pro 5 000 bytů. Provoz je plánován na základě poptávky po teple (až 8900 kW), elektřině (až 850 kW) a chladu (až 5500 kW).

V [61] a [55] jsou navrženy složitější, ale stále lineární modely zařízení, které počítají jak s plným zatížením, tak s částečným zatížením. Je zde také navržen obecný systém pro modelování a optimalizaci energetických zdrojů.

Problémy typu NLP a MINLP nejsou tolik řešeny, protože prostor řešení je většinou nekonvexní množina a není tak zaručeno nalezení globálního optima. Záleží na inicializačních hodnotách vstupních parametrů. Proto je možné tento problém částečně řešit opakovanou optimalizací vždy s náhodně zvolenými inicializačními hodnotami.

Pomocí MINLP metod se v práci [62] řeší návrh kogenerační jednotky tak, aby byly minimalizovány roční náklady na provoz při splnění poptávky po energiích. Nelinearita je obsažena ve výkonových charakteristikách uvažovaných zařízení. Výsledky jsou prezentovány na návrhu kogenerační jednotky pro čtyři budovy nemocnice. Poptávka po teple je až 4,4 MW a po elektřině až 2 MW.

V práci [63] je řešen optimální návrh a provoz kogeneračních jednotek do elektrického výkonu 20 MW s využitím detailnějších modelů parních turbín. Účelová funkce představuje zisk, který má být maximalizován. Jsou zde zahrnuty i emise CO<sub>2</sub>.

Nelineární problém minimalizace nákladů na provoz kogenerační jednotky je řešen v práci [64] za použití genetického algoritmu. Genetické algoritmy mají tu výhodu, že se při hledání řešení nezastaví v lokálním extrému.

Poměrně obsáhlý rozbor nelineárního problému návrhu a provozu kogenerační jednotky při maximálním zisku a jeho řešení lze najít v [65]. Problém je řešen pomocí několika MINLP řešičů, které využívají různých algoritmů a jsou porovnány jejich výsledky. Oproti ostatním, zde zmíněným, pracím obsahuje více detailů z teorie matematického programování.

Několik odborných prací se zabývá také využitím SP. O využití SP metod v energetice pojednává publikace [57]. Zde lze nalézt jak problémy krátkodobé a střednědobé, tak i dlouhodobé. Navíc jsou zde uvažovány regulovaný i neregulovaný trh s elektřinou. Práce [66] řeší plánování výroby elektřiny s využitím stochastického modelu, kde je náhodným parametrem poptávka po elektřině. V práci [67] je navržen třístupňový stochastický model plánování výroby elektřiny ve vodní elektrárně, který kombinuje jak krátkodobé tak i dlouhodobé plánování. Přehled literatury a odborných článků do roku 2006 na téma krátkodobého plánování kogeneračních systémů lze nalézt v [68].

Technicko-ekonomická optimalizace v oblasti energetického využití biomasy je řešena jen zřídka. V [69] jsou hledány optimální dávky uhlí a alternativních paliv s různými vlastnostmi při minimálních nákladech na provoz zařízení s kapacitou 68 MWe. Jde o nelineární problém. Autoři zde zahrnují také neurčitost některých parametrů s využitím tzv. “grey programming” modelu. Každý neurčitý parametr je zadán dvěma hodnotami – horní a dolní mezí. Účelová funkce je součtem účelových funkcí pro horní a dolní meze. Vedle toho je zde řešen také klasický deterministický model.

Další prací na téma využití biomasy je [70]. Zde jde však spíše o citlivostní analýzu parametrů. Článek se zabývá ekonomickým vyhodnocením spoluspalování biomasy a uhlí. Je vytvořen technicko-ekonomický model a na něm je provedena parametrická citlivost. Jde např. o vliv poměru spoluspalované biomasy na redukci emisí CO<sub>2</sub> nebo o vliv zvyšování ceny biomasy na zvýšení nákladů na výrobu elektřiny, atd. Přehled výpočtových nástrojů pro analýzu zařízení na využití obnovitelných zdrojů je uveden v práci [71].

V případě energetického využití biomasy velmi záleží na poloze zdroje a spotřebitele, protože cena za dopravu je významným ekonomickým faktorem. Práce [72] a [73] se zabývají minimalizací nákladů v řetězci dodávek biopaliv a také minimalizací jejich dopadu na životní prostředí.

Z oblasti energetického využití odpadů prakticky nelze nalézt žádné práce, řešící technicko-ekonomickou optimalizaci nebo simulaci. Jedním z důvodů může být problematický popis silně náhodného parametru – výhřevnosti odpadu. To představuje určitou výzvu, a proto bylo snahou autora dizertační práce přispět k řešení úloh z dané oblasti, zejména vytvořením modelu spalovny a využitím výhřevnosti jako vstupního parametru modelu.

### 3. CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE A POUŽITÉ METODY

V první kapitole byl nastíněn trend v oblasti energetického využití odpadů a biomasy. Je zřejmé, že biomasa je jedním z nejdůležitějších obnovitelných zdrojů energie a s jejím využíváním se počítá i do budoucna. V případě energetického využití odpadů je situace obdobná. Se zaváděním opatření proti skládkování bude vznikat více takových zařízení, která budou odpad využívat k výrobě elektřiny a tepla.

Aby byla tato zařízení provozována efektivně, je výhodné mít k dispozici podpůrné výpočtové nástroje např. pro predikci chování systému za různých podmínek, nalezení optimálního nastavení systému, apod.

Počítačové modely reálných technologických procesů jsou dnes již nepostradatelné pro většinu výpočtů. Vychází z principů popsanych v kapitole 2.1.

Implementace modelu do výpočtového nástroje umožňuje provádět s modelem experiment – tedy simulovat provoz a zjišťovat, jak se systém chová při různých nastaveních vstupních parametrů. Simulační přístupy jsou popsány v kapitole 2.2.

Efektivním způsobem, jak nalézt optimální nastavení systému, je použití matematické optimalizace (kapitola 2.3). Úloha optimalizace představuje ještě vyšší úroveň výpočtů než simulace, zejména vzhledem ke složitosti a způsobům řešení. Cílem dizertační práce je návrh systematického využití metod popsanych v kapitole 2 pro řešení praktických úloh z oblasti energetického využití odpadů a biomasy.


Navržená metodika se zaměřuje na postup při vytváření modelu, který je pak využit buď pro simulaci nebo pro optimalizaci na krátkodobém či dlouhodobém časovém horizontu.

Použití metodiky je demonstrováno na dvou reálných provozech. V prvním případě jde o vytvoření technicko-ekonomického simulačního modelu zařízení na energetické využití odpadů na základě provozních dat.

Ve druhém případě jde o návrh optimálního využití více druhů paliv v teplárenském provozu. Struktura postupu při řešení obou úloh je shrnuta v tab. 4 a tab. 5.


Tento postup je možné využít také v dalších příbuzných oblastech, což je demonstrováno na vytvoření technicko-ekonomického modelu energetického zdroje komplexu budov.

Tab. 4 Přehled cílů v oblasti tvorby technicko-ekonomických modelů zařízení EVO

Kapitola	Dílčí cíl	Způsob řešení
6.1	Seznámení se s modelovaným systémem	Prostudování podkladů k modelovanému systému
6.2	Topologie procesu a identifikace stěžejních aparátů	Rozvaha nad důležitostí technologických bloků vzhledem k použití modelu, sestavení blokového schématu
6.2	Koncepce simulačního modelu systému	Návrh modelu jednotlivých bloků a analýza stupňů volnosti
6.3	Posouzení charakteru a vlastností provozních dat	Použití diagnostických grafů, základních statistik a statistických testů
6.3	Modelování stěžejních aparátů na základě provozních dat	Použití regresní analýzy
6.4	Sestavení simulačního modelu celého systému	V případě sekvenčně-modulární simulace nastavení jednotlivých kroků výpočtu. V případě rovnicově orientované simulace implementace řešitele soustavy rovnic.
6.4	Ověření modelu systému	Porovnání výsledků simulace s provozními daty a ověření pomocí hmotnostní a energetických bilancí
6.5	Vytvoření technickoekonomického modelu	Doplnění výpočtu ekonomických efektů provozu systému (náklady na palivo, zisk z prodeje tepla a elektřiny atd.)
<div style="text-align: center;">   <b>HLAVNÍ CÍL:</b>  <b><i>Metodika tvorby technicko-ekonomických simulačních modelů zařízení na energetické využití odpadů</i></b> </div>		



Tab. 5 Přehled cílů v oblasti tvorby technicko-ekonomických modelů teplárenských provozů

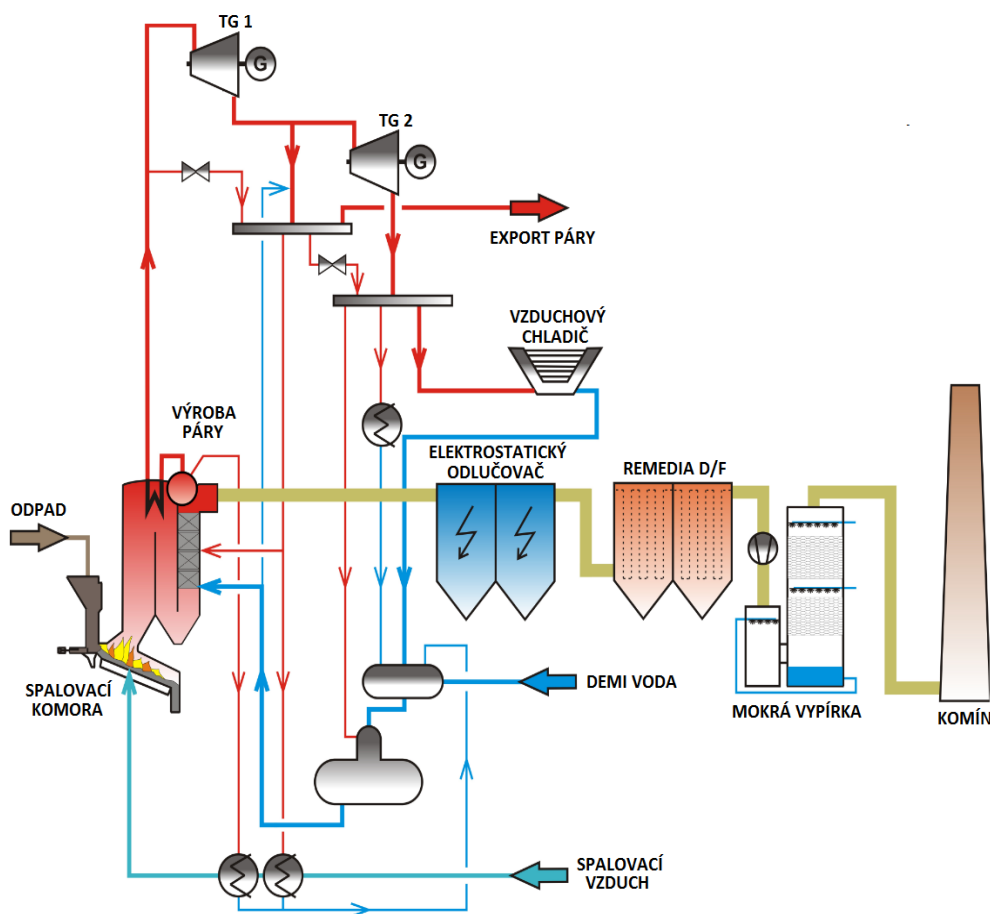
Kapitola	Dílčí cíl	Způsob řešení
7.1	Seznámení se s modelovaným systémem	Prostudování podkladů k modelovanému systému
7.1	Topologie procesu a identifikace stěžejních aparátů	Rozvaha nad důležitostí technologických bloků vzhledem k použití modelu, sestavení blokového schématu
7.2	Koncepce optimalizačního modelu	Návrh funkčních závislostí u jednotlivých aparátů a analýza stupňů volnosti
7.2	Modelování stěžejních aparátů na základě provozních dat	Použití regresní analýzy
7.3	Formulace optimalizační úlohy a prostoru přípustných řešení	Určení optimalizačního kritéria a sestavení účelové funkce, doplnění o omezující podmínky
<div style="text-align: center;">   <b>HLAVNÍ CÍL:</b>  <i>Metodika tvorby technicko-ekonomických optimalizačních modelů teplárenského provozu</i> </div>		

## 4. TECHNICKO-EKONOMICKÝ SIMULAČNÍ MODEL ZAŘÍZENÍ NA ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADŮ

Obsahem této kapitoly je popis postupu při vytváření technicko-ekonomického simulačního modelu zařízení na energetické využití odpadů. Metodika je prezentována na případové studii existující technologické jednotky TERMIZO, a.s. v Liberci. Na základě vstupních parametrů bude model počítat všechny parametry, které významněji ovlivňují ekonomiku provozu.

### 4.1 Popis technologické jednotky na energetické využití odpadů TERMIZO, a.s.

Zařízení pro energetické využívání živnostenského a komunálního odpadu TERMIZO je trvale v provozu od roku 2000. Zařízení sestává z jedné technologické linky s roční zpracovatelskou kapacitou 96 000 t odpadu (12 t/h). Návrhový fond pracovní doby činí 8000 h/rok. V důsledku přijatého opatření („on-line“ systém čištění teplosměnných ploch parního kotle) je fond pracovní doby od roku 2006 trvale překračován. Zařízení je umístěno v těsném sousedství teplárny, která zajišťuje odběr vyrobené tepelné a elektrické energie. Základní technologické schéma provozu je znázorněno na obr. 18.



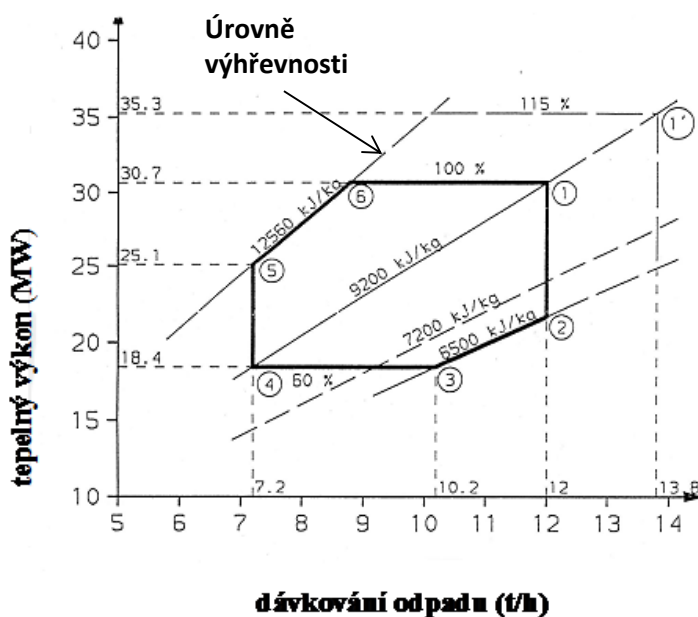
Obr. 18 Základní technologické schéma TERMIZO

Po dobu své existence je zařízení neustále modernizováno a doplňováno s cílem zlepšit efektivitu výroby energie ze spalovaného materiálu a minimalizovat negativní dopady provozu na životní prostředí.

Roštové topeniště s parním (utilizačním) kotlem tvoří jeden aparát. Parní kotel dále sestává z 3 radiačních (vertikálních) tahů a jednoho konvekčního (horizontálního) tahu. Dávkování odpadu je obecně závislé na výhřevnosti aktuálně zpracovávaného odpadu. Detailnějším rozбором výhřevnosti a způsobem výpočtu se zabývá práce [19]. S rostoucí výhřevností klesá množství odpadu, které je zařízení schopno zpracovat (viz obr. 19 poskytnutý provozovatelem).

Primární spalovací vzduch je předehříván párou na teplotu 140 až 160 °C a zaváděn pod rošt spalovací komory. Sekundární vzduch není předehříván a je zaváděn do oblasti dohořivací zóny. Dále se využívá spalinový recykl. Přibližně 20 až 30 % spalin je za elektrostatickým odlučovačem odvedeno zpět do spalovací komory.

Teplota v ohništi se pohybuje v rozmezí od 900 do 1130 °C. V dohořivací zóně je dosahováno teplot v rozmezí 850 až 950 °C, což je optimální rozsah z hlediska užití metody nekatalytického rozkladu oxidů dusíku (SNCR). Teplota 850 °C je z pohledu legislativy za posledním přívodem spalovacího (sekundárního) vzduchu minimální možná. Je nutno dodržet setrvání na této teplotě minimálně po dobu 2 sekund. V provozních stavech, které neumožňují dodržení stanovených limitů (odstávka, nižší kalorický obsah spalovaných odpadů), je nutno použít dohřev spalin zemním plynem. Struska je odváděna přes vodní uzávěr do bunkru strusky, kde je smíchána s vypraným popílkem. Spaliny jsou po průchodu jednotlivými radiačními tahy ochlazovány na cca 630°C před vstupem do konvekční sekce.



Obr. 19 Výkonový diagram roštu

Parní kotel je napájen chemicky upravenou (demineralizovanou) vodou ze sousední teplárny. Voda je ve vlastním provozu dále předehřívána na teplotu cca 115 °C, s touto teplotou napájecí voda vstupuje do parního kotle. Výstupem je pára o jmenovitém průtoku 35 t/h, teplotě 400 °C a tlaku 4,1 MPa (středotlaká pára). Tato pára je primárně využita k výrobě elektrické energie v prvním turbinovém stupni (TG1).

Z prvního turbinového stupně odchází pára o teplotě 270 °C a tlaku 1,1 MPa (nizkotlaká pára). Tato pára může být dále využita v systému centrálního zásobování teplem (teplárnou) a k technologickým účelům ve spalovně (předehřev spalovacího vzduchu, ohřev kondenzátu, ohřev spalin).

V případě že pro teplo není odbyt, může být nizkotlaká pára dále využita v druhém turbinovém stupni (TG2) k výrobě další elektrické energie. Nízko-potenciální odchozí pára z TG2 (200 kPa, 210 °C) je využita k předehřevu vratného kondenzátu a odplynění. Může být rovněž dále využívána k vytápění budovy spalovny, případně mařena ve vzduchovém chladiči. Rozsah průtoků, ve kterých mohou TG2 a vzduchový chladič pracovat, je 4 až 18 t/h.

Původní uspořádání systému využití tepla (tj. do roku 2010) způsobovalo problémy s uplatněním vyrobeného tepla, které se dodává do Teplárny Liberec, v období, kdy je spotřeba tepla v síti CZT nižší, než tepelný výkon spalovny. Další problémy nastávaly v přechodném období, kdy byla spotřeba tepla v síti CZT vyšší než tepelný výkon spalovny, ale protitlaková turbína v teplárně nebyla odstavena a byla provozována v minimálním režimu. Omezená spotřeba tepla se projevovala jednak snížením zpracovatelské kapacity nebo mařením přebytečného tepla.

Z tohoto důvodu byl realizován projekt instalace druhého stupně expanze páry a vzduchového kondenzátoru přebytečné páry. Realizace projektu umožnila podstatně zefektivnění provozu zejména v obdobích s požadovanou nižší potřebou dodávky tepla do Teplárny Liberec. Projekt rovněž umožnil zefektivnění provozu při ostatních provozních stavech, protože nově instalovaná turbína TG2 nahradila redukční stanici RS 11/3, přes kterou pára proudila pro účely předehřevu kondenzátu, odplynění a vytápění budovy. Tyto hmotnostní toky nyní přispívají k výrobě elektrické energie. Instalace druhého stupně expanze páry znamená další stupeň volnosti při řízení. Pro efektivní provoz a jeho plánování, stejně tak pro určení finančních efektů s tímto spojených, je simulační model velmi přínosným nástrojem.

Základní výkonové parametry provozu TERMIZO uvádí tab. 6. Celý parní cyklus se zvýrazněnými podstatnými proudy je znázorněn v PID diagramu na obr. 20 (poskytnuto provozovatelem).

Tab. 6 Výkonové parametry TERMIZO

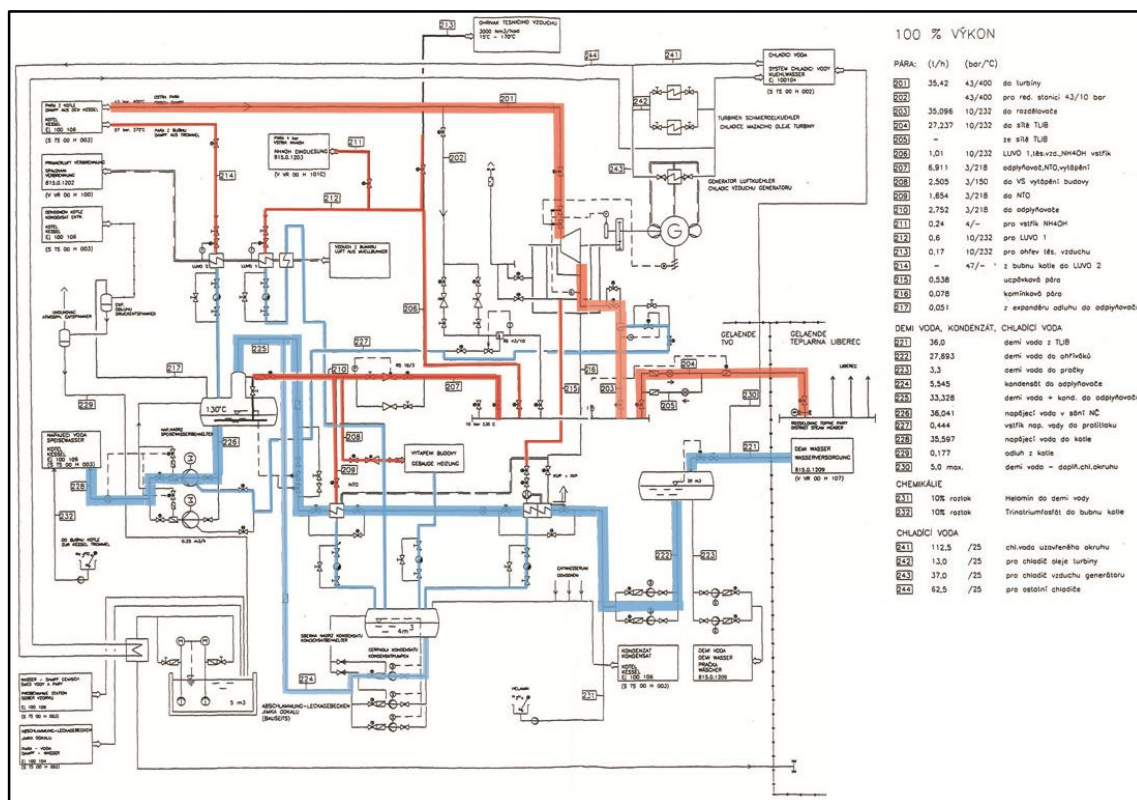
Pozn.: množství elektrické energie vyrobené na TG2 závisí na průtoku páry turbínou (viz výše), ten je tím vyšší, čím nižší je export páry do Teplárny Liberec

Veličina	jednotka	
Maximální trvalý tepelný výkon kotle	(MW)	30,7
Jmenovité množství vyrobené páry	(t/h)	35,0
Výroba tepelné energie (ve formě páry)	(MW)	24,1
Výroba elektrické energie TG1	(MW)	2,5
Výroba elektrické energie TG2	(MW)	0,125 – 0,985

Systém čištění spalin lze charakterizovat jako čtyřstupňový s průtokem spalin přibližně 60000 m<sup>3</sup>/h.

V prvním stupni probíhá snižování emisí oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>) pomocí SNCR. Do spalin je v oblasti druhého radiačního tahu kotle (850 – 900 °C) dávkován 25% roztok hydroxidu amonného (NH<sub>4</sub>OH).

Druhým stupněm čištění je snížení emisí tuhých znečišťujících látek (TZL) v elektrostatickém odlučovači, který navazuje bezprostředně na parní kotel. Teplota spalin na vstupu do elektrostatického odlučovače je přibližně 220 až 250 °C.



Obr. 20 Parní cyklus TERMIZO s vyznačenými podstatnými proudy

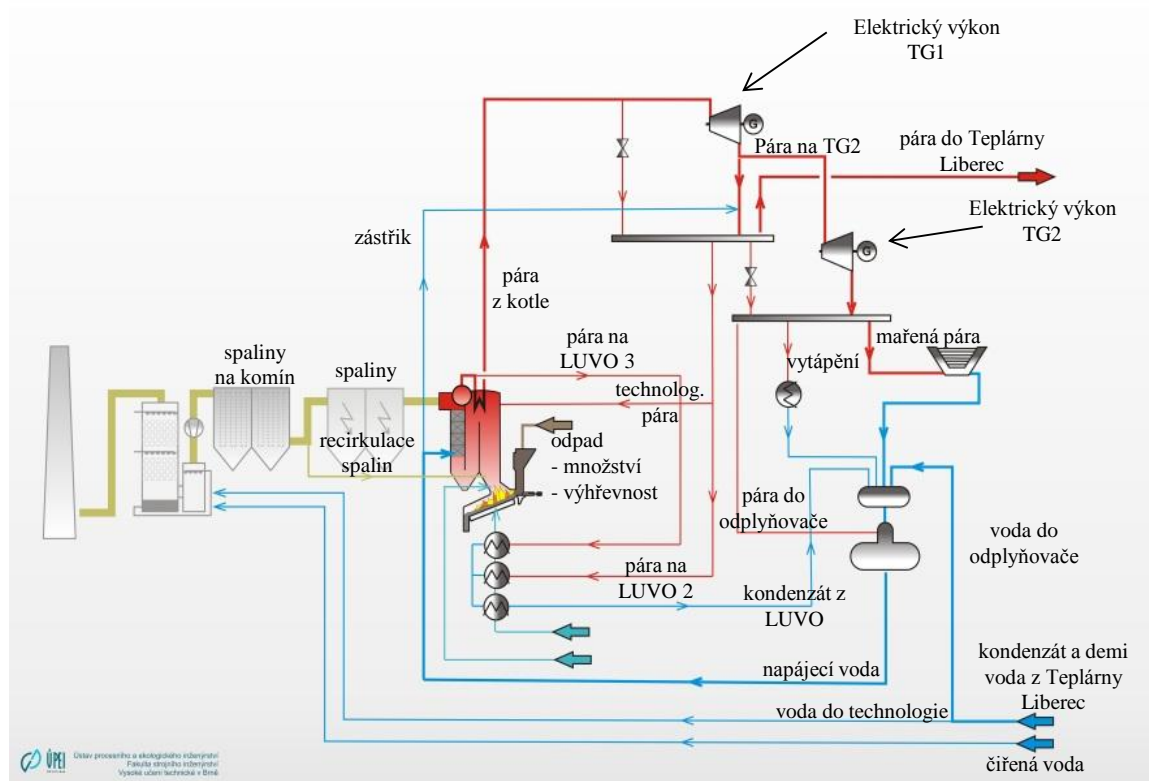
Ve třetím stupni probíhá primární redukce emisí organických látek typu PCCD/F, užitím technologie REMEDIA D/F<sup>TM</sup>. Doprovodným efektem je finální záchyt úletů jemného popílku až na zbytkovou koncentraci cca 1 až 2 mg/m<sup>3</sup>. Teplota spalin na vstupu do dioxinového filtru se pohybuje v rozmezí 200 až 220 °C.

Finálním stupněm úpravy spalin je fyzikálně-chemické čištění, uskutečňované kontaktem plynů s absorpčními roztoky různé alkality spalin v mokré pračce, kde je dosahován záchyt kyselých složek znečišťujících látek (zejména HCl, HF, a SO<sub>2</sub>) a emisí těžkých kovů nebo jejich sloučenin. Spaliny dále odchází do komína s teplotou přibližně 65 °C.

## 4.2 Identifikace stěžejních technologických bloků a návrh simulačního modelu

Z hlediska účelu modelu (technicko-ekonomická simulace) je nejpodstatnější parní cyklus, protože kromě likvidace odpadu má spalovna hlavní příjmy z prodeje tepla a elektřiny. Zaměříme-li se tedy na parní cyklus, tak první v pořadí je kotel na odpadní teplo neboli blok výroby páry (obr. 21). Z kotle se odděluje část páry na přehřev vzduchu, tzv. pára LUVO 3. Potenciál této páry se nevyužívá k výrobě elektřiny. Zbývající množství páry (po odečtení páry na LUVO 3) je vedeno na první stupeň výroby elektřiny – turbogenerátor TG1. Zde se část energie páry přemění na mechanickou práci, která je využita k pohonu turbíny a generování elektřiny. Za TG1 pokračuje stále ještě přehřátá pára do rozdělovače, kde se oddělují větve určené pro technologické účely, větve pro přehřev vzduchu, tzv. pára na LUVO 2, dále množství páry pro výrobu tepla vedené do Teplárny Liberec a zbývající množství je vedeno na druhý stupeň výroby elektřiny – turbogenerátor TG2. Část páry za tímto stupněm je použita do odparyvače, část na

vytápění objektu a zbytek se maří ve vzduchovém chladiči. Kondenzát ze vzduchového chladiče, kondenzát z předeřevu vzduchu (LUVO 2 a LUVO 3) a vratný kondenzát z Teplárny Liberec jsou sesbírány v nádrži sběrného kondenzátu a následně vedeny do nádrže napájecí vody. Kondenzát se termicky upravuje a ohřívá na teplotu 105 °C.



Obr. 21 Stěžejní bloky a proudy v TERMIZO zahrnuté do modelu

Napájecí voda je pak vedena zpět do kotle, kde se vyrábí pára. Ještě před vstupem do kotle, je část napájecí vody oddělena a použita jako zástřík páry za TG1, čímž je dosaženo požadovaných parametrů této páry. Z Teplárny Liberec ještě spalovna odebírá čiřenou vodu do technologie čištění spalín.

Co se týče využití elektřiny, tak část elektřiny vyrobené na TG1 a TG2 je využita pro vlastní potřebu provozu, zbytek je exportován do sítě.

Dalším podstatným proudem jsou spaliny. Jejich množství ovlivňuje náklady na čištění a také spotřebu elektřiny. Z ekonomického hlediska však nejde o výraznou část.

Dále je rozebrán návrh koncepce modelu, který popisuje provoz zařízení TERMIZO a bude použit pro simulační výpočty. Podle topologie, znalostí technologie a toho, zda jsou parametry měřeny (tab. 7), lze odhadnout pravděpodobné empirické závislosti.

Množství vyrobené páry závisí zejména na množství dávkovaného odpadu a jeho výhřevnosti:

$$m_{ST} = f(m_w, LHV_w) \quad (6.1)$$

Výkonu TG1 závisí zejména na množství páry vedené na TG1. Dalšími faktory jsou tlak a teplota vyráběné páry a tlak na výstupu z TG1. Výkon TG1 je tedy:

$$P_{TG1} = f(m_{ST}, t_{in,TG1}, p_{in,TG1}, p_{out,TG1}) \quad (6.2)$$

Tab. 7 Stěžejní parametry TERMIZO

Parametr	Jednotka	Označení	Měřeno
množství dávkovaného odpadu	(t/h)	$m_W$	ano
výhřevnost odpadu	(GJ/t)	$LHV_W$	ne
množství vyrobené páry v kotli	(t/h)	$m_{ST}$	ano
elektrický výkon TG1	(kW)	$P_{TG1}$	ano
teplota páry na vstupu na TG1	(°C)	$t_{in,TG1}$	ano
tlak páry na vstupu na TG1	(kPa)	$p_{in,TG1}$	ano
tlak páry na výstupu z TG1	(kPa)	$p_{out,TG1}$	ano
množství páry vedené na TG2	(t/h)	$m_{ST,TG2}$	ano
elektrický výkon TG2	(kW)	$P_{TG2}$	ano
teplota páry na vstupu na TG2	(°C)	$t_{in,TG2}$	ano
tlak páry na vstupu na TG2	(kPa)	$p_{in,TG2}$	ano
tlak páry na výstupu z TG2	(kPa)	$p_{out,TG2}$	ano
export elektřiny	(kW)	$P_{ELE,EXP}$	ano
export páry do Teplárny Liberec	(t/h)	$m_{ST,EXP}$	ano
množství páry na LUVO 3	(t/h)	$m_{ST,LUVO3}$	ano
množství páry na LUVO 2	(t/h)	$m_{ST,LUVO2}$	ne
množství napájecí vody na zástřík	(t/h)	$m_{W,DESUP}$	ano
množství páry pro technologické účely	(t/h)	$m_{ST,TECH}$	ne
množství páry do odplyňovače	(t/h)	$m_{ST,DEAR}$	ne
množství páry potřebné pro vytápění	(t/h)	$m_{ST,BUILD}$	ne
množství mařené páry	(t/h)	$m_{ST,WASTE}$	ne
množství čířené vody	(t/h)	$m_{W,C}$	ano
množství demi vody	(t/h)	$m_{W,DEMI}$	ano
množství vody do odplyňovače	(t/h)	$m_{W,DEAR}$	ne
množství vody do technologie	(t/h)	$m_{W,TECH}$	ne
množství spalin	(m <sup>3</sup> /h)	$V_{FG}$	ano
množství spalin na komín	(m <sup>3</sup> /h)	$V_{FG,STACK}$	ano

Stejně tomu bude i v případě výkonu TG2:

$$P_{TG2} = f(m_{ST,TG2}, t_{in,TG2}, p_{in,TG2}, p_{out,TG2}) \quad (6.3)$$

Vlastní spotřeba elektřiny, a tudíž i export elektřiny, se do značné míry odvíjejí od výkonu jednotky. Vlastní spotřeba, potažmo export, závisí na výkonu obou turbogenerátorů:



$$P_{ELE,EXP} = f(P_{TG1}, P_{TG2}) \quad (6.4)$$

Ačkoliv bylo avizováno, že export páry do Teplárny Liberec závisí na poptávce po teple, předpokládáme pro tuto chvíli, že export páry závisí hlavně na množství vyrobené páry:

$$m_{ST,EXP} = f(m_{ST}) \quad (6.5)$$

Množství páry na LUV03 závisí na množství vyrobené páry jakožto na ukazateli výkonu provozu:

$$m_{LUV03} = f(m_{ST}) \quad (6.6)$$

Množství páry na LUV02 se neměří. Je proto třeba zkombinovat výsledek z modelování uzlu množství páry na LUV03 s bilančními rovnicemi přehřevu vzduchu. Pro bilance budou použity odhady některých parametrů (zejména parametry přehřívání vzduchu) na základě technické dokumentace a provozních zkušeností. Model uzlu množství páry na LUV02 má tyto nezávislé proměnné:

$$m_{LUV02} = f(m_W, LHV_W, m_{ST}) \quad (6.7)$$

Množství napájecí vody na zástřik závisí na množství zastřikované páry a teplotě této páry. Teplota páry závisí na vnitřní termodynamické účinnosti TG1, která je dána zatížením turbíny, tedy množstvím vyrobené páry, které je na TG1 vedeno. Množství páry na zástřik je pak dáno rozdílem množství vyrobené páry a množství páry vedené na TG2. Funkce pro množství napájecí vody na zástřik je:

$$m_{W,DESUP} = f(m_{ST}, m_{TG2}, P_{TG1}) \quad (6.8)$$

Množství páry pro technologické účely není měřeno a nelze jej ani bilančně dopočítat. Proto je uvažováno jako konstantní hodnota, která byla odhadnuta na základě technické dokumentace:

$$m_{ST,TECH} = \text{const.} \quad (6.9)$$

Čířená voda, kterou TERMIZO odebírá pro svou potřebu z Teplárny Liberec, se používá v systému čištění spalin, a proto množství čiřené vody je závislé především na množství spalin, které prochází systémem čištění:

$$m_{W,C} = f(V_{FG,STACK}) \quad (6.10)$$

Množstvím demi vody je označen rozdíl mezi množstvím páry exportované do Teplárny Liberec a množstvím kondenzátu, který je z Teplárny Liberec přiváděn zpět do TERMIZO. Množství demi vody je tedy závislé především na množství páry exportované do Teplárny Liberec:

$$m_{W,DEMI} = f(m_{ST,EXP}) \quad (6.11)$$

Množství spalin ovlivňuje kromě množství odpadu a výhřevnosti také množství primárního a sekundárního vzduchu a množství recirkulovaných spalin. Kvůli zjednodušení proto předpokládáme, že vhodnou nezávislou proměnnou pro vysvětlení variability množství spalin bude množství vyrobené páry. Voda se díky teplu předanému ze spalin mění v páru. Tepelný tok odebraný spalinám je závislý na jejich průtoku a teplotních podmínkách. Je-li zaveden předpoklad, že teploty v kotli a za kotlem se udržují poměrně



konstantní, je výroba páry závislá pouze na průtoku spalín a naopak – průtok spalín na množství vyrobené páry:

$$V_{FG} = f(m_{ST}) \quad (6.12)$$

Množství spalín vedených do komín pak závisí na množství produkovaných spalín:

$$V_{FG,STACK} = f(V_{FG}) \quad (6.13)$$

Tímto jsou vyčerpány možnosti modelování na základě provozních dat. Dále jsou popsány uzly, které je nutné modelovat na základě hmotnostních a energetických bilancí.

Množství páry na TG2:

$$m_{ST,TG2} = m_{ST,TG1} - m_{ST,LUVO2} - m_{ST,TECH} - m_{ST,EXP} + m_{W,DESUP} \quad (6.14)$$

Množství mařené páry:

$$m_{ST,WASTE} = m_{ST,TG2} - m_{ST,DEAR} - m_{ST,BUILD} \quad (6.15)$$

Výpočet množství páry do odplyňovače vychází z bilance napájecí nádrže. Smyslem bilance je na základě určení teploty napájecí vody určit průtok páry pro ohřev a odplynění tak, aby byla tato teplota dosažena. Entalpie napájecí vody, entalpie páry do odplyňovače, entalpie kondenzátů z LUVO, entalpie kondenzátu z vytápění, resp. maření, entalpie vody do odplyňovače  $h_{BFW}, h_{ST,DEAR}, h_{LUVO}, h_{BW}, h_{W,DEAR}$  lze vypočítat na základě technické dokumentace a provozních zkušeností.

$$\begin{aligned} m_{ST,DEAR} = & \frac{(m_{ST,LUVO2} + m_{ST,LUVO3} + m_{BUILD} + m_{ST,WASTE} + m_{W,DEAR} + m_{ST,DEAR}) \cdot h_{BFW}}{h_{ST,DEAR}} \\ & - \frac{(m_{ST,LUVO2} + m_{ST,LUVO3}) \cdot h_{LUVO} + (m_{BUILD} + m_{ST,WASTE}) \cdot h_{BW}}{h_{ST,DEAR}} \\ & - \frac{m_{W,DEAR} \cdot h_{W,DEAR}}{h_{ST,DEAR}} \end{aligned} \quad (6.16)$$

Spotřeba tepla pro vytápění je závislá hlavně na venkovní teplotě, a proto byl zvolen jednoduchý model, který uvažuje s proměnlivou spotřebou páry v jednotlivých měsících. V podstatě jde o konstantu pro každý měsíc.

$$m_{ST,BUILD} = \text{const.} \quad (6.17)$$

Množství vody do odplyňovače je součtem odkalu, resp. odluhu kotle, který je cca 2 %, dále množství páry pro technologické účely a množství exportované páry do Teplárny Liberec.

$$m_{W,DEAR} = m_{ST} \cdot 0,02 + m_{ST,TECH} + m_{ST,EXP} \quad (6.18)$$

Množství vody do technologie je pak rozdíl mezi množstvím vody přivedené z Teplárny Liberec (množství demi vody + množství exportované páry) a množstvím vody do odplyňovače.

$$m_{W,TECH} = m_{W,DEMI} + m_{ST,EXP} - m_{W,DEAR} \quad (6.19)$$

V modelu je celkem 27 proměnných a 19 rovnic. Z těchto údajů plyne, že počet stupňů volnosti je  $27-19=8$ . Aby byla soustava rovnic řešitelná, je třeba zadat hodnoty osmi proměnných.

### 4.3 Statistické zpracování dat a modelování jednotlivých technologických uzlů

Společnost TERMIZO poskytla pro účely modelování provozní data s údaji za rok 2009 a 2010 (do září včetně). Data jsou zaznamenána ve formě 15-minutových průměrů. Tento soubor obsahuje 61 248 hodnot. Vzhledem k tomu, že jde o poměrně velký počet, bylo nutné pro práci s daty vytvořit z původního souboru hodinové průměry, čímž se rozsah souboru dat redukuje na 15 312. Dále byl použit deník s daty, která zaznamenávají operátoři provozu, a to pro zjištění hodnot množství čiřené vody a demi vody. Zde se jedná o dvanáctihodinové průměry.

Při analýze dat bylo použito statistických metod popsanych v kapitole 2.1. Pokud není uvedeno jinak, všechny předpoklady pro použité metody (zejména pro ANOVA a MNČ – viz kapitola 2.1) jsou splněny.

#### 4.3.1 VÝHŘEVNOST ODPADU

Složení odpadu je velmi nehomogenní, a proto je výhřevnost odpadu  $LHV_w$  vlastně náhodná veličina. Protože je ale vstupním parametrem modelu, je vhodné o ní mít potřebné informace, na základě kterých lze odhadnout její hodnotu. Vzhledem k tomu, že výhřevnost odpadu nelze měřit, protože experimentální stanovení reprezentativního vzorku je prakticky neproveditelné, odhaduje se výhřevnost pomocí empiricky určeného vzorce, který odpovídá metodice BREF (Reference Document on Best Available Techniques) [74]:

$$LHV_{w,1} = 1,133 \cdot \frac{m_{ST,W}}{m_w} \cdot h_{ST,HP,NET} + 0,008 \cdot t_b - 0,801$$

$$h_{ST,HP,NET} = h_{ST} - h_{WATER}$$

kde

$LHV_{w,1}$	výhřevnost odpadu (MJ/kg)
$m_{ST,W}$	množství páry vyrobené z odpadu bez podílu páry vyrobené z importované energie (kg/h) (zde myšleno jako $m_{ST}$ - viz níže)
$m_w$	množství spalovaného komunálního odpadu
$h_{ST,HP,NET}$	měrné zvýšení entalpie páry v kotli
$t_b$	teplota spalin za kotlem
$h_{ST}$	měrná entalpie páry na výstupu z kotle (MJ/kg), určená na základě tlaku a teploty páry na výstupu
$h_{WATER}$	měrná entalpie napájecí vody (MJ/kg), určená na základě tlaku a teploty napájecí vody

Parametr  $m_{ST,W}$  je definován jako průtok páry vyrobené pouze spalováním odpadu, tedy bez průtoku páry vyrobené z importované energie. Obvykle se proto od páry na výstupu z kotle odečítá průtok odpovídající entalpickému toku vnesenému do procesu přídatnými palivy (např. zemní plyn). V tomto případě ovšem spalování probíhá bez

přídavných paliv. Nejvýznamnější entalpický tok, který se přidává k proudu spalin, je předehřev primárního spalovacího vzduchu.

Proto byl parametr  $m_{ST,W}$  určen na základě průtoku páry na výstupu z kotle, který byl zmenšen o podíl, odpovídající poměru entalpického toku předehřátého primárního vzduchu k tepelnému toku ze spalování. Výsledný vzorec pro určení výhřevnosti spalovaného odpadu vznikne dosazením za parametr  $m_{ST,W}$ :

$$m_{ST,W} = m_{ST} - m_{ST} \cdot \frac{v_{PRIM,AIR} \cdot h_{PRIM,AIR}}{m_W \cdot LHV_W}$$

$$LHV_{W,2} = 1,133 \cdot \frac{m_{ST} - m_{ST} \cdot \frac{v_{PRIM,AIR} \cdot h_{PRIM,AIR}}{m_W \cdot LHV_{W,1}}}{m_W} \cdot h_{ST,HP,NET} + 0,008 \cdot t_b - 0,801$$

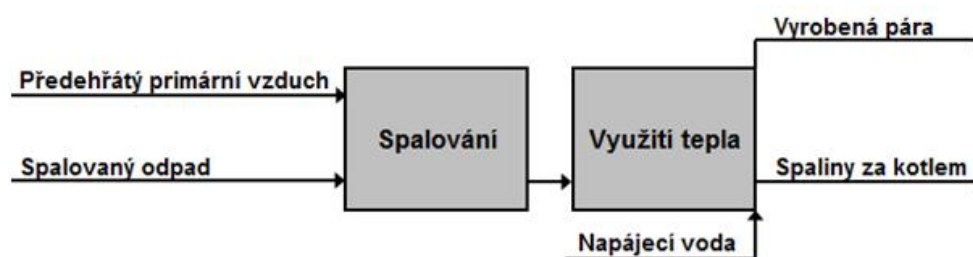
kde

$LHV_{W,2}$	výhřevnost odpadu po odečtu předehřevu primárního vzduchu (MJ/kg)
$m_{ST}$	množství páry na výstupu z kotle
$v_{PRIM,AIR}$	průtok předehřátého primárního vzduchu
$h_{PRIM,AIR}$	měrná entalpie předehřátého primárního vzduchu

Tato úprava sníží vypočítanou hodnotu výhřevnosti o cca 4 %.

Všechny hodnoty, potřebné pro určení výhřevnosti spalovaného odpadu, jsou průběžně měřeny a zaznamenávány v provozním deníku. Schéma výpočtu je na obr. 22.

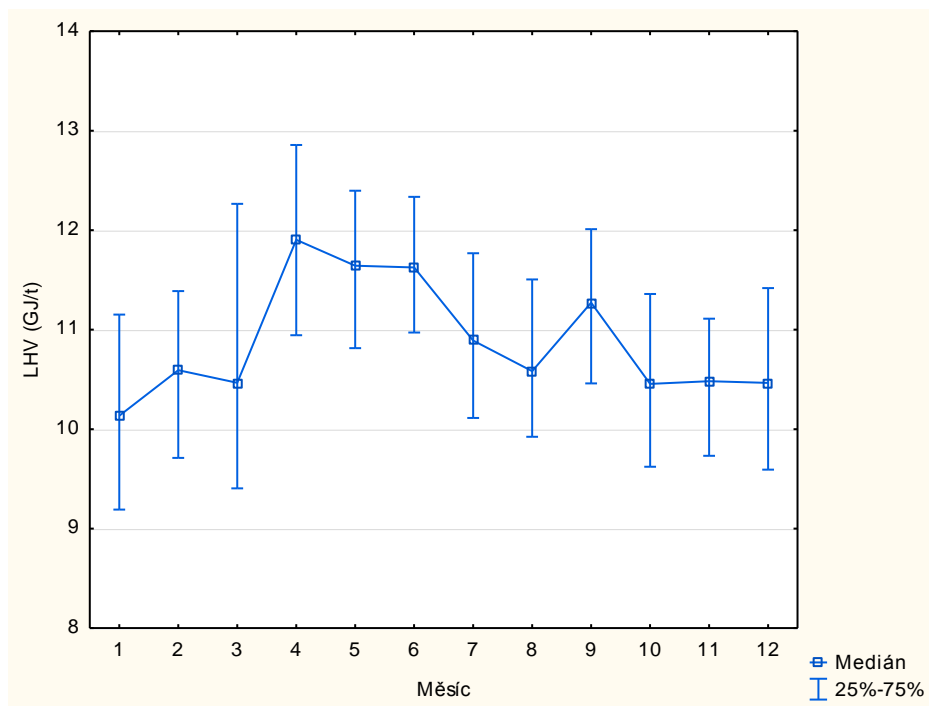
Z provozních zkušeností vyplývá, že průměrná výhřevnost odpadu je variabilní v průběhu roku. Přitom nižší výhřevnosti odpadů je pozorována v zimním období, což by mohlo být způsobeno vyšším množstvím balastních komponent (např. popel). Vyšší výhřevnost v teplých měsících by mohla být vysvětlena vyšším obsahem vysoce výhřevných odpadů (např. vyšší obsah obalových materiálů, zejména PET lahví). Tuto hypotézu bylo třeba nejprve ověřit pomocí statistických metod, konkrétně pomocí ANOVA nebo K-W testu. Byla testována hypotéza, zda se významně liší výhřevnost v jednotlivých kalendářních měsících.



Obr. 22 Schéma upraveného výpočtu výhřevnosti odpadu

Při ověřování předpokladů pro ANOVA bylo zjištěno, že data většinou nepocházejí z normálního rozdělení. Normalita však byla porušena jen mírně a vzhledem k většímu počtu dat (řádově stovky) toto porušení nemá vliv na výsledky. Ovšem homogenita rozptylů se nepotvrdila. ANOVA by tedy mohla vést k nesprávným závěrům, a proto se přistoupilo ke K-W testu. Ten zamítl hypotézu o shodě mediánů. Jinými slovy, alespoň v

případě jedné dvojice měsíců je rozdíl ve výhřevnosti statisticky významný. To, o jakou dvojici, případně jaké dvojce jde, lze zjistit pomocí metody mnohonásobného porovnání. Například výhřevnost v měsíci lednu se významně liší od výhřevností v dubnu, květnu, červnu, červenci a září. To je také patrné z grafu na obr. 23, odkud lze odhadnout i další významně rozdílné dvojice.



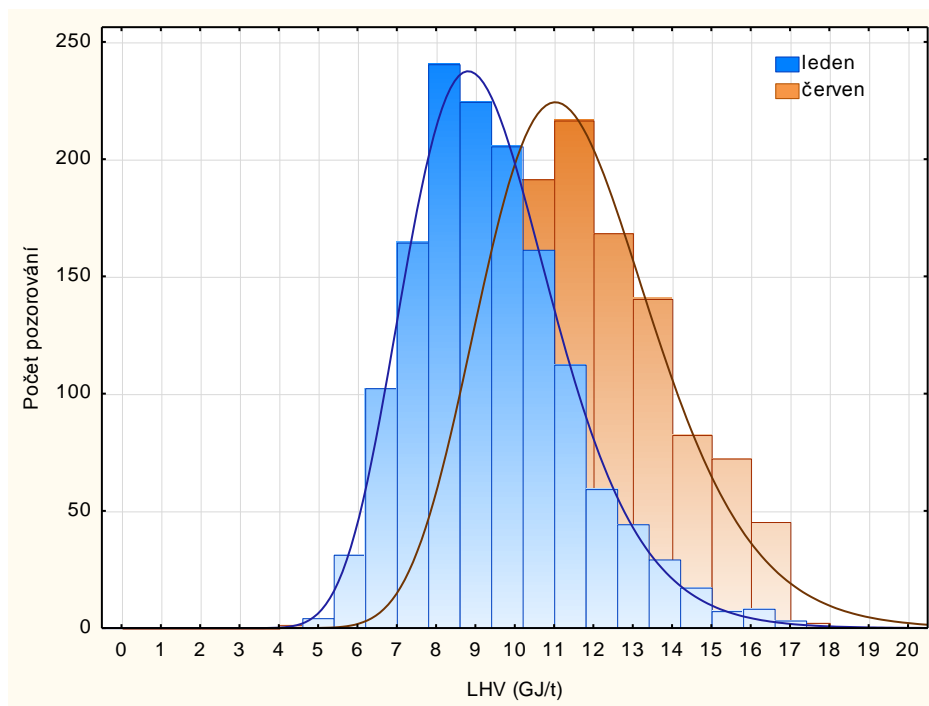
Obr. 23 Krabicový graf výhřevnosti v jednotlivých měsících

Jak už bylo poznamenáno výše, výhřevnost je náhodná veličina. Náhodnou veličinu nelze popsat jedinou hodnotou, ale pravděpodobnostním rozdělením, ze kterého pochází. Přitom může jít o aproximaci nějakého známého rozdělení, nebo o empirické rozdělení. Pro simulace systémů s náhodnými veličinami existují speciální postupy – např. metoda Monte Carlo, kdy se generuje větší množství realizací náhodné veličiny z daného pravděpodobnostního rozdělení; pro každou vygenerovanou hodnotu proběhne výpočet a výsledky se poté mohou statisticky zpracovat. Tedy i výsledek je náhodná veličina. V případě výhřevnosti lze rozdělení aproximovat log-normálním rozdělením, které je dáno dvěma parametry – průměrem a rozptylem. To, že náhodná veličina pochází z nějakého předem odhadnutého rozdělení, lze stanovit pomocí testu dobré shody. Vzhledem k předchozím výsledkům je vhodné najít parametry log-normálního rozdělení pro každý měsíc zvlášť. Na obr. 24 je porovnávána aproximace log-normálním rozdělením pro měsíce leden a červen. Je zřejmé, že leden má nižší průměr než červen a zároveň nižší rozptyl. Přesné hodnoty jsou v tab. 8.

Tab. 8 Průměry a rozptyly výhřevnosti odpadu pro měsíce leden a červen

	průměr (GJ/t)	rozptyl ((GJ/t) <sup>2</sup> )
leden	9,42	4,12
červen	11,68	5,03

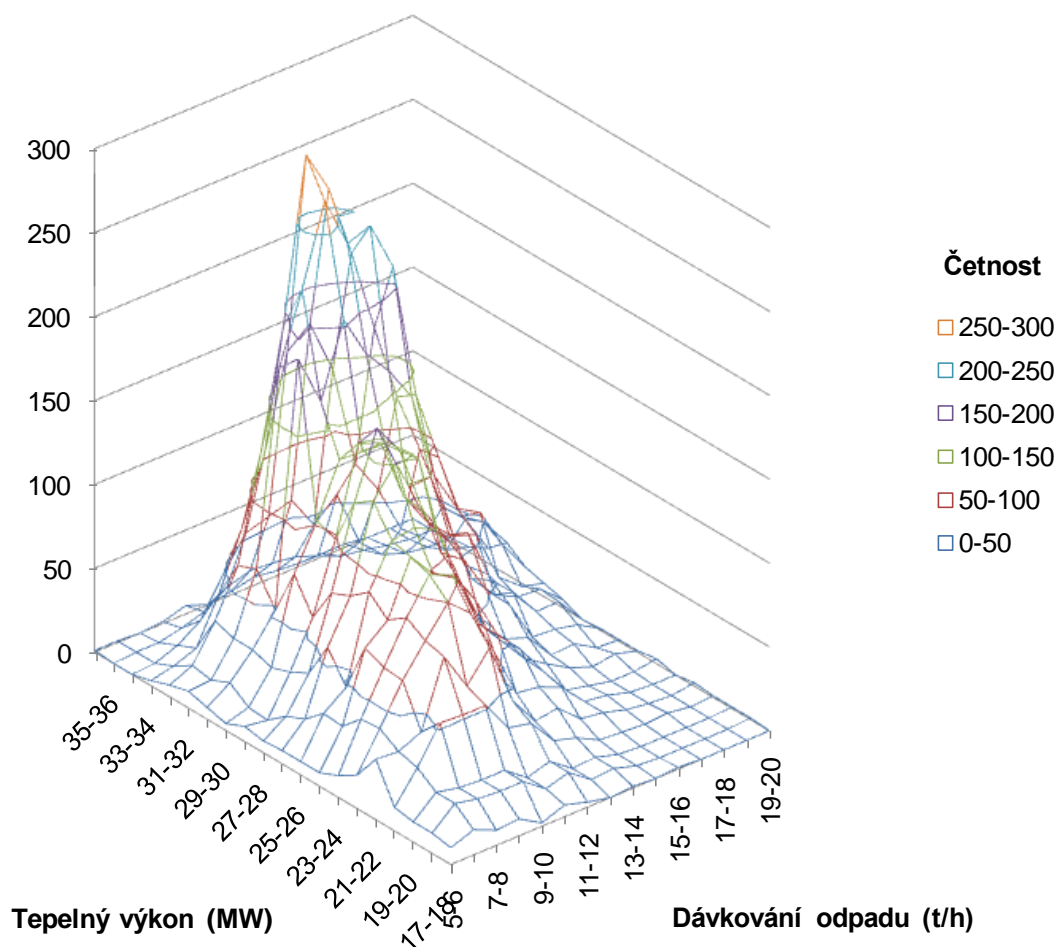
Je třeba podotknout, že vstupní data pro výpočet výhřevnosti (množství páry, množství odpadu) mohou být zatížena chybou. Zejména v případě množství odpadu, které je stanoveno pomocí vah zabudovaných v drapáku, může být výraznější chyba. Záleží totiž na okamžiku vážení a na tom, kolik ze zváženého materiálu skutečně spadne do násypky kotle. Zpřesněním výpočtu výhřevnosti se zabývá práce [19].



Obr. 24 Aproximace rozdělení výhřevnosti log-normálním rozdělením

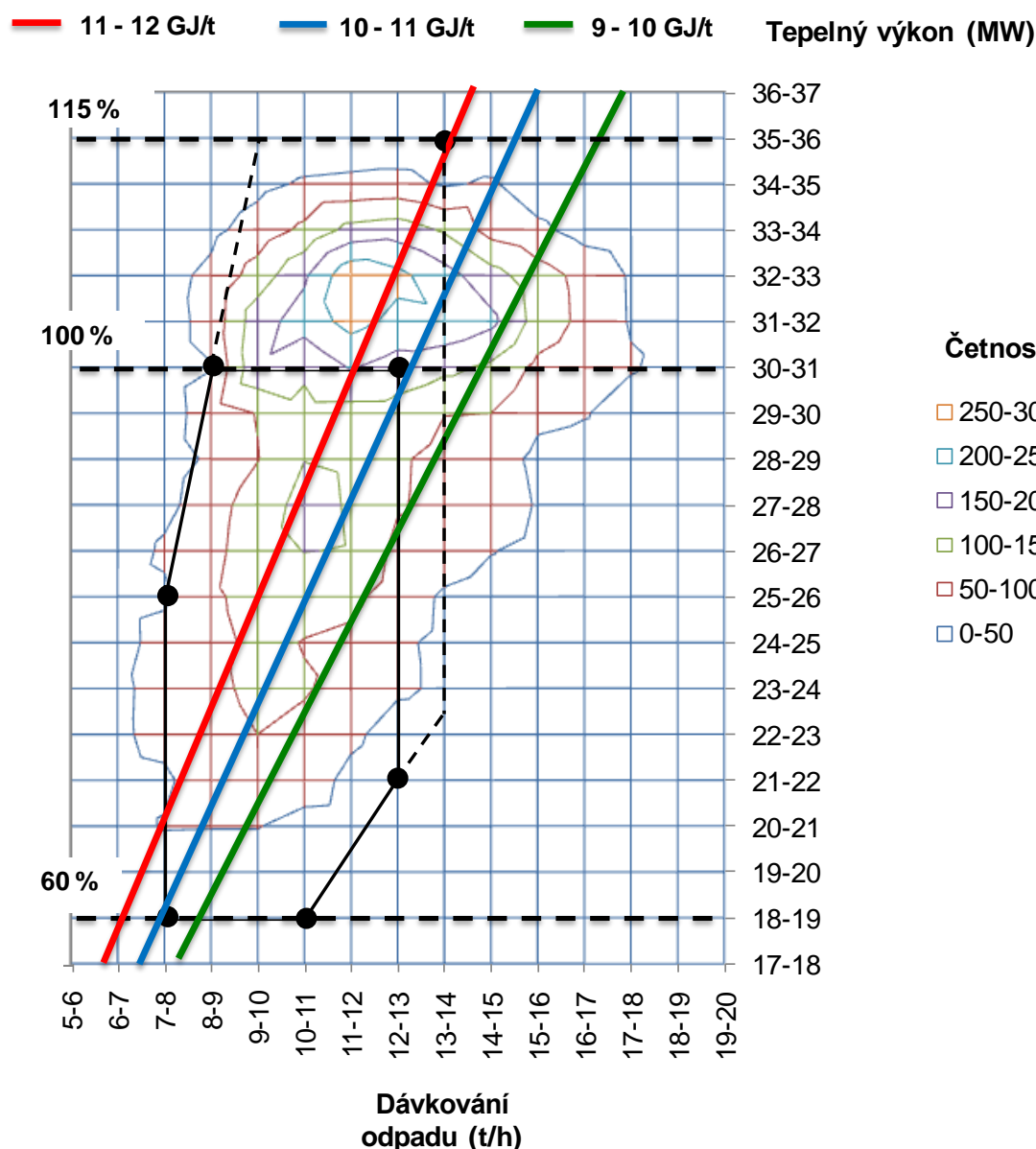
Důležitou informací nejen o výhřevnosti, ale také o dávkování odpadu, lze získat z grafů na obr. 19, obr. 25 a obr. 26. Graf na obr. 19 znázorňuje návrhový diagram roštu. Zařízení je projektováno pro zpracování odpadů o výhřevnosti 6,5 až 12,56 MJ/kg, pro průměrnou výhřevnost odpadu byla uvažována hodnota 9,2 MJ/kg. Tepelný výkon zařízení (teplo předané teplosměnným systémem) při zpracovatelském výkonu 12 t/h odpovídá 30,7 MW. Představu o skutečném způsobu provozování zařízení s ohledem na návrhový diagram dávají obr. 25 a obr. 26, ve kterých je znázorněna četnost pozorování (počet výskytů určitých provozních režimů ve sledovaném období) v určitých výkonových pásmech. Výkonová pásma jsou vyjádřena jako dvojice tepelný výkon a dávkovaný odpad. Je patrné, že nejvyšší četnost výskytu má pásmo, kdy se dávkuje 11 až 12 tun odpadu za hodinu při tepelném výkonu kolem 32 MW (asi 42 t/h páry). Dále jsou v grafu znázorněny přímky pro několik intervalů výhřevnosti. Zmíněné výkonové pásmo s nejvyšší četností odpovídá výhřevnosti 11 – 12 GJ/t. Průměrná výhřevnost 10,50 spadá do přímky pro interval 10 – 11 GJ/t, která prochází středem celé výkonové oblasti.

Srovnají-li se grafy z obr. 19 a obr. 26, je vidět rozdíl v křivkách výkonu pro různé hodnoty výhřevnosti. Zde se údaje mírně liší, což je pravděpodobně způsobeno odlišným přístupem při vyhodnocení výhřevnosti. I proto je třeba používat jednotný a co nejpřesnější způsob výpočtu, viz [19]. I tak se ale dá hovořit o poměrně dobré shodě. Je také vidět, že po výraznou část dostupného pracovního fondu je zařízení provozováno ve výkonovém pásmu mezi 100 % až 115 % nominálního výkonu (cca 40 % všech naměřených bodů). Dá se tedy říci, že téměř polovinu provozní doby se výkon zařízení drží nad nominálním výkonem.



Obr. 25 Prostorový graf četnosti pozorování jednotlivých výkonových pásem

Na základě uvedených výsledků lze doporučit, jakým způsobem s výhřevností při simulaci pracovat. Pokud půjde o důslednější analýzu, která bude vyžadovat metody stochastické simulace, je potřeba brát výhřevnost jako náhodnou veličinu určenou pravděpodobnostním rozdělením. Pokud půjde o simulaci typického (pravděpodobného) provozního stavu, pak je doporučeno přihlédnout k rozdílnosti výhřevností v jednotlivých měsících a jako hodnotu výhřevnosti použít medián (případně průměr, pokud jde o normální rozdělení) v daném měsíci. Zároveň se doporučuje vzít v úvahu četnost výskytu různých provozních stavů a tím odhadnout typické množství dávkovaného odpadu pro danou hodnotu výhřevnosti.



Obr. 26 Četnost pozorování jednotlivých výkonových pásem

#### 4.3.2 UZEL VÝROBY PÁRY

Množství vyrobené páry je jedním z nejdůležitějších provozních ukazatelů. Uzel výroby páry představuje hlavní část systému utilizace tepla. Teplo ze spalín, které vznikají při termické likvidaci odpadu, je využito v kotli na odpadní teplo k výrobě páry z napájecí vody. Závislou proměnnou je v tomto případě množství vyrobené páry a předpokládá se, že závisí na množství dávkovaného odpadu a jeho výhřevnosti. Tedy nezávislé proměnné jsou množství dávkovaného odpadu a výhřevnost.

Bylo testováno několik tvarů modelu (maximálně do polynomu druhého stupně). Jednotlivé modely byly posuzovány podle indexu determinace a podle celkové složitosti modelu. Jako nevhodnější se jeví regresní funkce ve tvaru  $m_{st} = a \cdot m_w \cdot h_w + b$ , kde  $a, b$  jsou odhadované parametry regresní funkce. Popis modelu je sumarizován v tab. 9

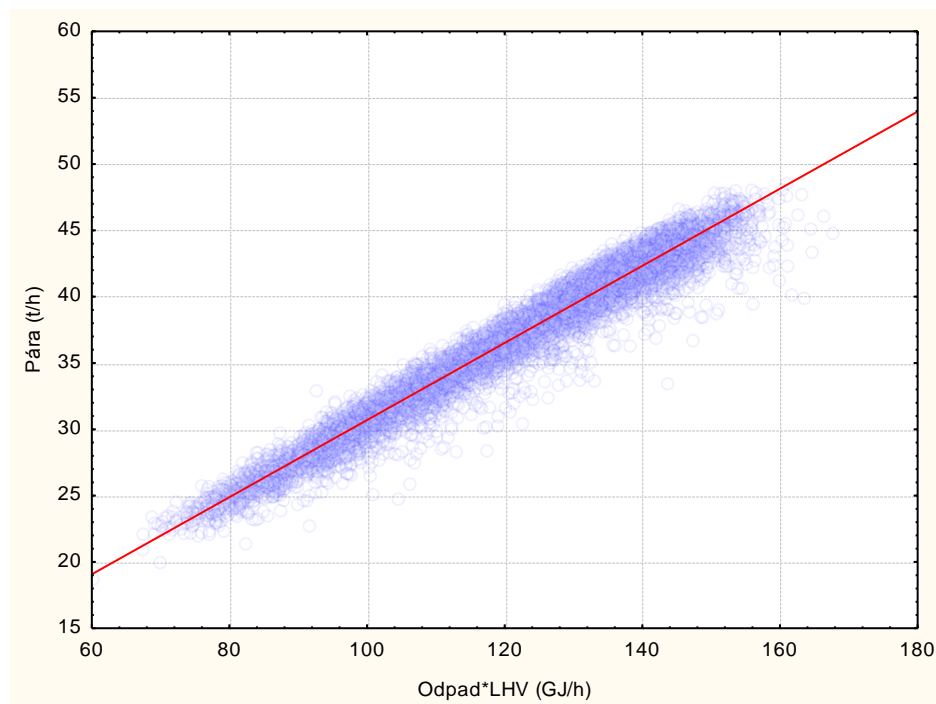
a tab. 10. Křivka regresní funkce je zobrazena na obr. 27. Je vidět, že proložení je poměrně přesné.

Tab. 9 Proměnné v modelu výroby páry

Veličina	Jednotka	Označení	Poznámka
Množství vyrobené páry	[t/h]	$m_{ST}$	Závislá proměnná
Množství odpadu	[t/h]	$m_W$	Nezávislá proměnná
Výhřevnost odpadu	[GJ/t]	$LHV_W$	Nezávislá proměnná

Tab. 10 Parametry modelu výroby páry

Parametr modelu	Tvar/hodnota
Regresní funkce	$m_{ST} = 0,29 \cdot m_W \cdot LHV_W + 1,64$
Index determinace	0,98



Obr. 27 Křivka regresní funkce pro výpočet množství páry

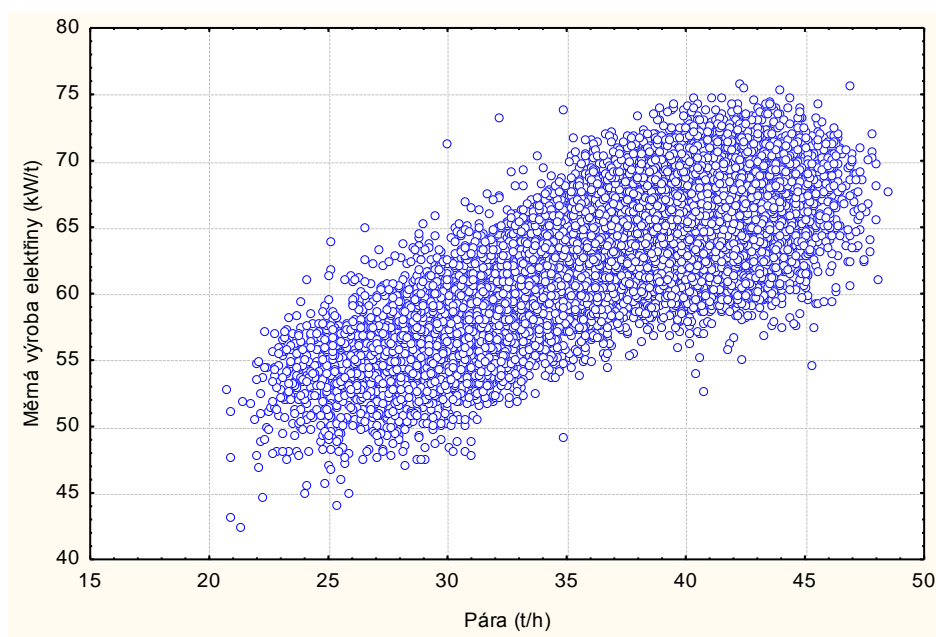
#### 4.3.3 UZEL VÝROBY ELEKTŘINY NA PROTITLAKÉ PARNÍ TURBÍNĚ

Na uzel výroby páry navazuje uzel výroby elektřiny na TG1. Jedná se vlastně o model protitlakové turbíny. V tomto technologickém uzlu dochází k přeměně tepelné energie, obsažené ve středotlaké páře (4,1 MPa, 400°C), na energii pohybovou, která vyvozuje točivý moment na hřídeli. Pára pak působením na lopatky rotoru vyvozuje moment vůči hřídeli. Tím je poháněn generátor na výrobu elektrického proudu. Z páry se po průchodu prvním stupněm (TG1) stává nízkotlaká pára (1,1 MPa, 230°C), jež se využívá jako zdroj tepla. Zde se předpokládala závislost výkonu TG1 (závislá proměnná)



zejména na množství páry vedené na TG1, dále na tlaku a teplotě vyráběné páry a na tlaku na výstupu z TG1 (nezávislé proměnné). Pomocí t-testu bylo prokázáno, že všechny proměnné v modelu jsou významné a index determinace je 0,97. Tedy variabilita výkonu TG1 je velmi dobře modelem zahrnujícím průtok páry a vstupní a výstupní parametry páry za TG1 vysvětlena. Avšak aktuální teplota a tlak vyrobené páry a tlak na výstupu z turbíny by musely být zadávány jako vstupní parametry celkového modelu nebo by musela být nalezena jejich závislost na některém z dalších vstupních parametrů. Byla provedena detailní analýza s cílem toto prověřit.

Obr. 28 znázorňuje měrný výkon TG1 na 1 t zpracované páry v závislosti na průtoku páry. Při vyšších průtocích je rozptyl bodů větší, což značí, že zde je výkon více ovlivněn i některou další veličinou.

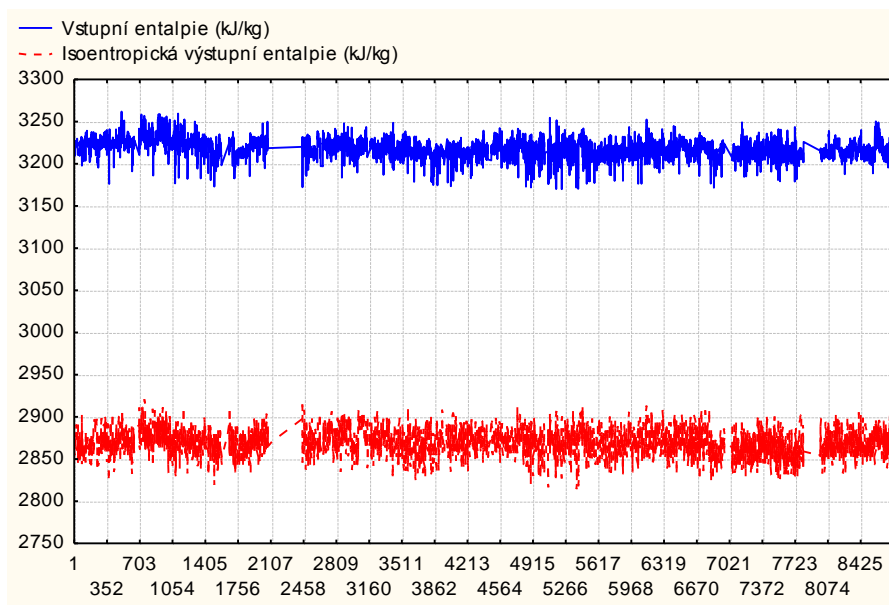


Obr. 28 Bodový graf měrné výroby elektřiny v závislosti na páře

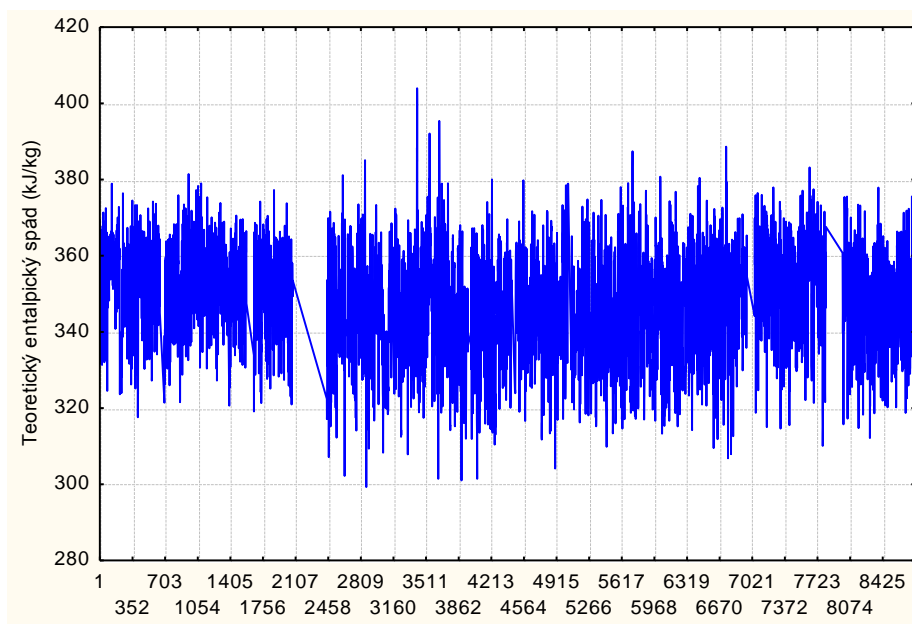
Tento rozptyl lze vysvětlit právě parametry páry před a za TG1. Protože se teplota páry za TG1 neměří, nelze entalpii na výstupu z TG1 přímo určit. Pro účely další analýzy bylo využito entalpie, která odpovídá ideální isoentropické expanzi na tlak za TG1. Tu lze bilančně snadno dopočítat. Tato entalpie je dále označena jako výstupní isoentropická entalpie. Pro srovnání parametrů vyjádřených entalpiemi před a za TG1 je uveden obr. 29. Jejich rozdíl pak vytváří teoretický entalpický spád, který se pohyboval mezi 320 až 370 kJ/kg (obr. 30).

Tlakový spád není ovlivněn průtokem páry, ale pouze regulační schopností zařízení udržet konstantní parametry páry před a za TG1. Zároveň nelze vysledovat jakoukoliv závislost parametrů páry na veličinách vyskytujících se v modelu. S rostoucím průtokem páry se zjevně zvyšuje rozkmit hodnot parametrů páry, což může být důsledek problematičtější regulace kotle. Parametry páry by tedy do modelu musely být zahrnuty jako vstupní parametry. To je ale problematické, protože by se jednalo pouze o hrubý odhad, čímž by se problém neřešil. Proto se dále zjišťovala síla vlivu jednotlivých nezávislých proměnných na výkon TG1 pomocí standardizovaných regresních koeficientů. Porovnání ukázalo, že největší vliv má množství páry vedené na TG1, a to přibližně 4,5 krát větší vliv než ostatní veličiny. To nasvědčuje tomu, že i model popisující závislost výkonu TG1 pouze na množství páry vedené na TG1 by mohl být velmi kvalitní a proto lze

ostatní nezávislé proměnné vynechat. Index determinace pro tento model je 0,92 (došlo tedy jen k mírnému snížení). Proložení křivky regresní funkce naměřenými daty je na obr. 31. Model je sumarizován v tab. 11 a tab. 12.



Obr. 29 Vstupní a isoentropická výstupní entalpie páry na TGI



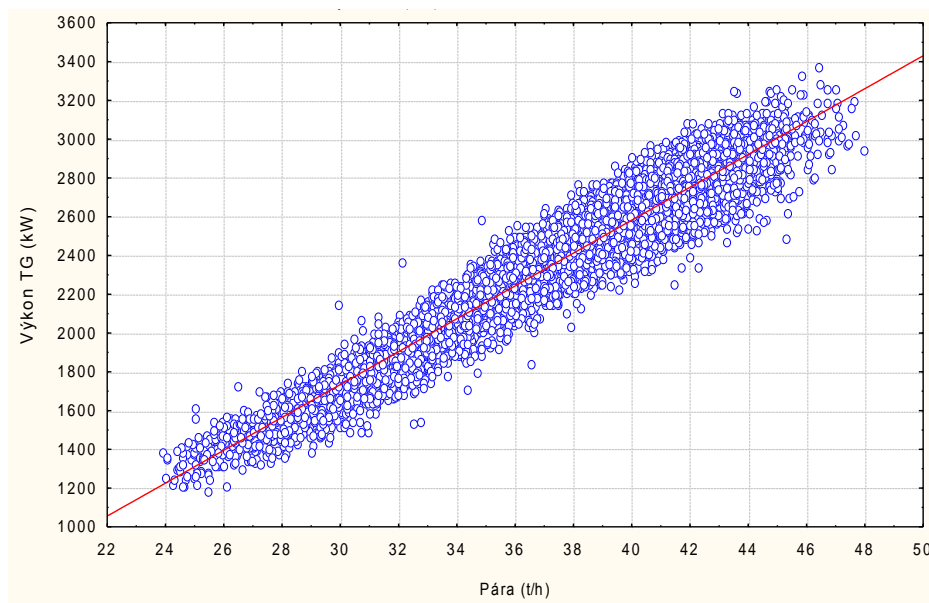
Obr. 30 Teoretický entalpický spád na TGI

Tab. 11 Proměnné v modelu výkonu TG1

Veličina	Jednotka	Označení	Poznámka
Výkon TG1	[kW]	$P_{TG1}$	Závislá proměnná
Množství páry vedená na TG1	[t/h]	$m_{ST,TG1}$	Nezávislá proměnná

Tab. 12 Parametry modelu výkonu TG1

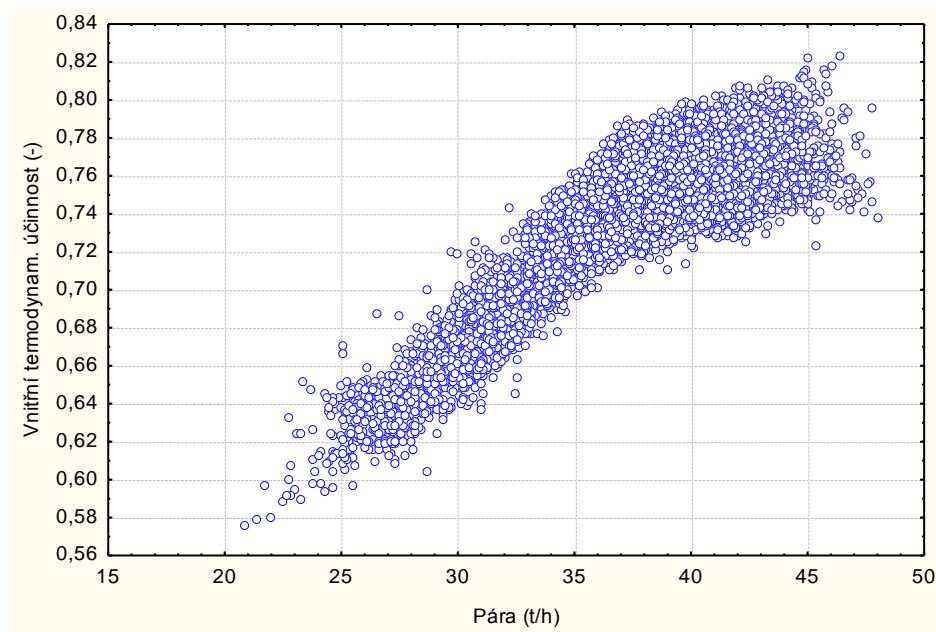
Parametr modelu	Tvar/hodnota
Regresní funkce	$P_{TG1} = 84,78 \cdot m_{ST,TG1} + 809,25$
Index determinace	0,92



Obr. 31 Křivka regresní funkce pro výpočet výkonu TG1

Na závěr této části je třeba zmínit ještě jeden důležitý fakt, který vyplynul z analýzy TG1. Vnitřní termodynamická účinnost turbíny nemá konstantní hodnotu, ale mění se s průtokem páry, čemuž odpovídá i nižší měrná výroba při nižších průtocích (viz obr. 28). S využitím provozních dat v kombinaci s teoretickými modely expanze páry na turbíně byla vnitřní termodynamická účinnost TG1 dopočítána (elektromechanická účinnost turbíny odhadnuta podle podkladů z literatury na 0,88 [75]). Průběh závislosti vnitřní termodynamické účinnosti na množství páry je vidět na obr. 32. To znamená, že s rostoucím množstvím páry roste i celková účinnost turbíny.

Větší množství nízkotlaké páry za TG1 se exportuje do Teplárny Liberec, menší množství se využívá pro vlastní spotřebu. Zbytek páry za TG1 se dále využívá pro výrobu elektřiny na druhém stupni odběrové kondenzační turbíny - TG2.



Obr. 32 Vnitřní termodynamická účinnost TG1

#### 4.3.4 UZEL VÝROBY ELEKTŘINY NA KONDENZAČNÍ TURBÍNĚ

Model výroby elektřiny na TG2 byl sestaven na datech z období 1. 6. 2010 (zahájení provozu TG2) až 30. 9. 2010. I když je rozsah menší než u ostatních modelů, je stále dostatečný. Při hledání vhodné aproximační funkce se vycházelo ze zkušenosti z vytváření modelu TG1, tedy že postačí závislost výkonu TG2 na množství páry vedené na TG2. Index determinace vychází v tomto případě 0,96, což potvrzuje velmi kvalitní model. Přesné proložení křivky regresní funkce naměřenými hodnotami je vidět i z obr. 33. Shrnutí modelu obsahují tab. 13 a tab. 14.

Tab. 13 Proměnné v modelu výkonu TG2

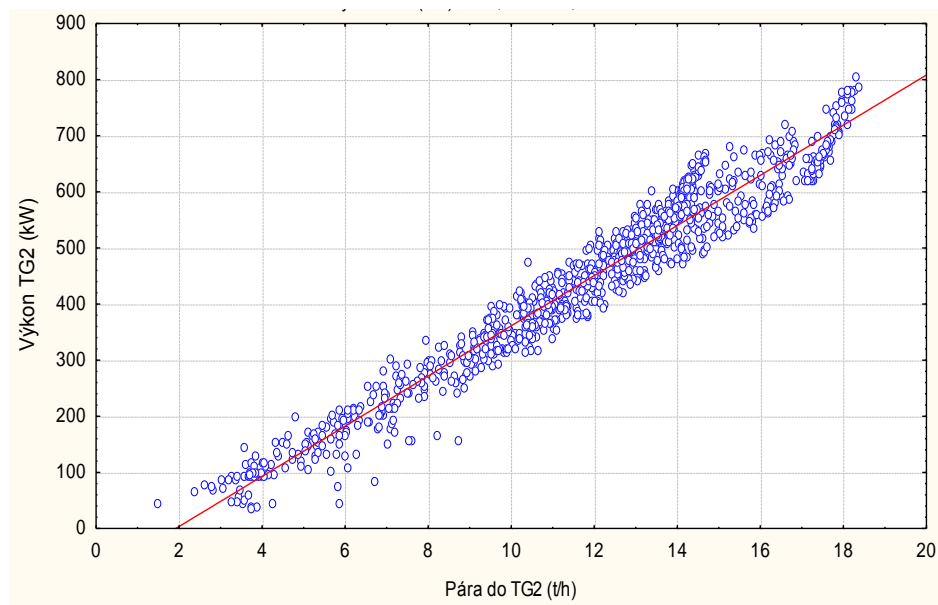
Veličina	Jednotka	Označení	Poznámka
Výkon TG2	[kW]	$P_{TG2}$	Závislá proměnná
Množství páry vedená na TG2	[t/h]	$m_{ST,TG2}$	Nezávislá proměnná

Tab. 14 Parametry modelu výkonu TG2

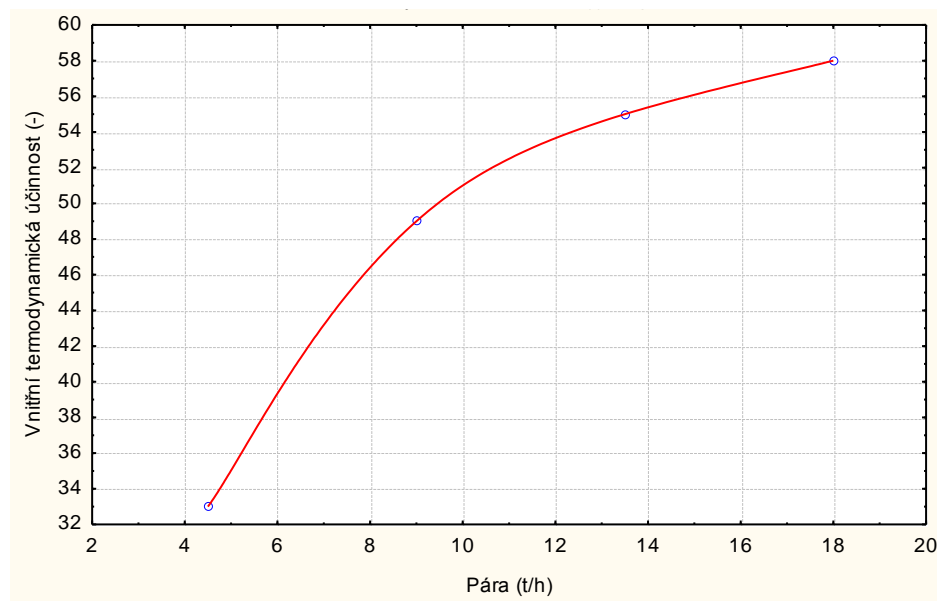
Parametr modelu	Tvar/hodnota
Regresní funkce	$P_{TG2} = 44,71 \cdot m_{ST,TG2} - 85,84$
Index determinace	0,96

I zde byla analyzována vnitřní termodynamická účinnost turbíny (elektromechanická účinnost odhadnuta podle podkladů z literatury na 0,87 [5]). Data z provozního deníku nebyla v tomto případě využita. Naměřené hodnoty tlaku a teploty za TG2 byly evidentně nesprávné, jelikož si navzájem neodpovídaly. Podle výpočtu s využitím termodynamického modelu parní turbíny bylo zjištěno, že pravděpodobně hodnoty tlaku za TG2 jsou příliš vysoké; v důsledku toho vycházely hodnoty vnitřní termodynamické účinnosti přes 90 %, což je nereálné. Hodnoty tlaku páry za TG2 se dle naměřených dat většinou pohybují mezi

0,5 až 0,6 MPa, což také neodpovídá navrhovanému tlaku. Proto se vycházelo z výkonové charakteristiky turbíny poskytnuté výrobcem. Zjištěný průběh vnitřní termodynamické účinnosti pro TG2 zobrazuje obr. 34.



Obr. 33 Křivka regresní funkce pro výpočet výkonu TG2



Obr. 34 Vnitřní termodynamická účinnost na TG2

Ve srovnání s vnitřní termodynamickou účinností turbíny TG1 je vnitřní termodynamická účinnost TG2 podstatně nižší. To odpovídá obecně známým závislostem, že turbíny s vyššími výkony jsou účinnější. Vzhledem k tomu, že Teplárna Liberec snížila tlak páry v systému CZT (tlak páry za TG1), došlo ke zvýšení entalpického spádu na TG1, ale rovněž adekvátně ke snížení entalpického spádu na TG2. Tato úprava zřejmě byla pro TERMIZO z pohledu výroby elektřiny přínosem, protože je logicky výhodnější realizovat expanzi páry co nejvíce na turbíně, která je efektivnější, tj. na TG1. V době vypracování

studie se o snížení tlaku páry v systému CZT teprve uvažovalo a tato skutečnost tedy není v modelu zahrnuta.

#### 4.3.5 UZEL EXPORTU ELEKTŘINY

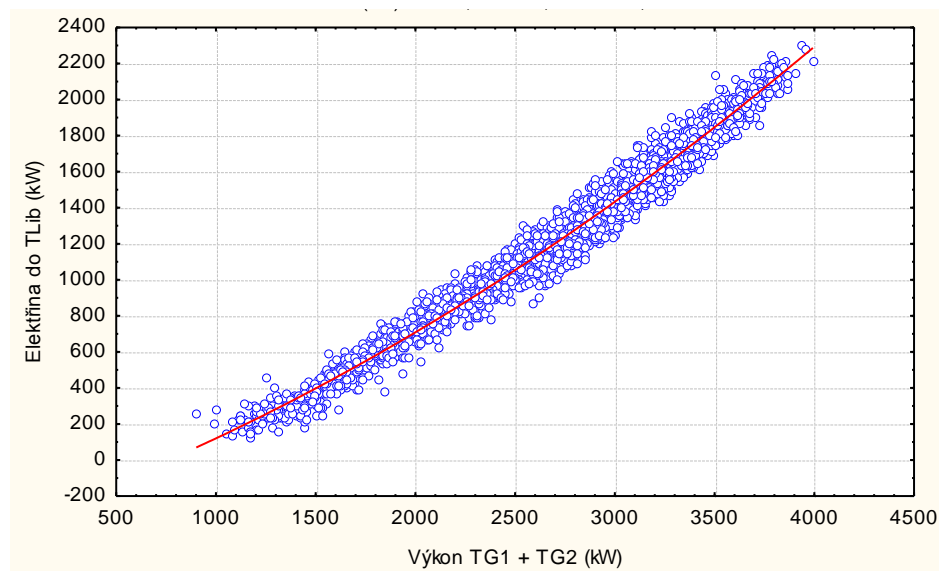
Vlastní spotřeba elektřiny, a v důsledku toho i export elektřiny, se do značné míry odvíjí od výkonu jednotky. Předpokládala se tedy závislost exportu na výkonu obou turbogenerátorů. Jako v předchozím případě, i tady pochází data z období 1. 6. 2010 až 30. 9. 2010, kdy již byla v provozu i TG2. Model pro export elektřiny je ve tvaru polynomu druhého stupně (obr. 35) a je sumarizován v tab. 15 a tab. 16.

Tab. 15 Proměnné v modelu exportu elektrické energie

Veličina	Jednotka	Označení	Poznámka
Export elektrické energie	[kW]	$P_{ELE,EXP}$	Závislá proměnná
Výkon TG1	[kW]	$P_{TG1}$	Nezávislá proměnná
Výkon TG2	[kW]	$P_{TG2}$	Nezávislá proměnná

Tab. 16 Parametry modelu exportu elektrické energie

Parametr modelu	Tvar/hodnota
Regresní funkce	$P_{ELE,EXP} = 0,68 \cdot 10^{-4} \cdot (P_{TG1} + P_{TG2})^2 + 0,38 \cdot (P_{TG1} + P_{TG2}) - 331,98$
Index determinace	0,98



Obr. 35 Křivka regresní funkce pro výpočet exportu elektřiny

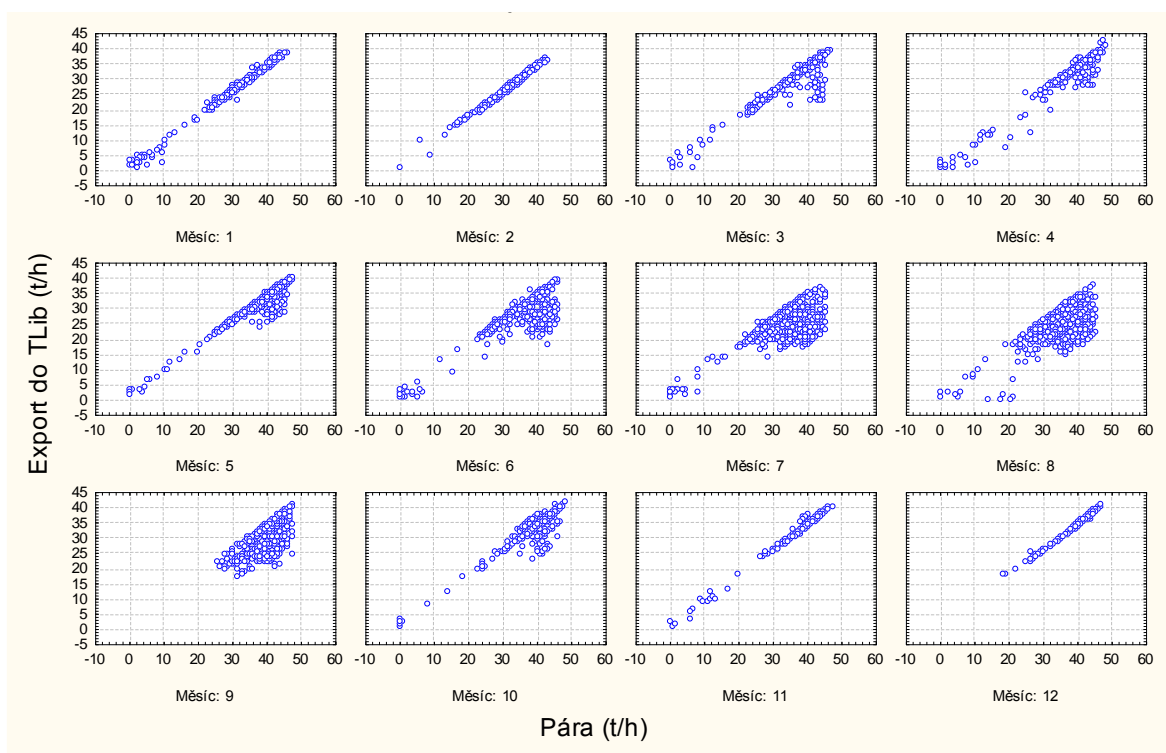
#### 4.3.6 UZEL EXPORTU PÁRY DO TEPLÁRNY LIBEREC

Export páry do Teplárny Liberec závisí na vlastní spotřebě páry a na požadavku ze strany Teplárny Liberec, který se odvíjí od poptávky po teple. Pokud tato poptávka existuje, provozovatel spalovny se snaží dodat maximální množství páry. Vliv poptávky po



teple je demonstrován na obr. 36, kde jsou znázorněny korelace mezi výrobou páry v kotli a exportem páry do Teplárny Liberec. Pro období říjen až květen (zimní období) je export tepla ve formě páry do Teplárny Liberec poměrně hodně závislý na výkonu TERMIZO (na výrobě páry). V období červen až září je tato závislost porušena z důvodu snížené poptávky po teple. Ta je navíc hodně variabilní v jednotlivých hodinách, či dnech.

Vzhledem k podstatě problému a jen velmi špatně odhadnutelné spotřebě tepla v síti (dle vyjádření představitelů TERMIZO nelze dostatečně přesně odhadnout dodávky tepla na základě předpovědi počasí) je model páry exportované do Teplárny Liberec ponechán jako vstupní parametr modelu. Tím odpadá jedna rovnice a v důsledku toho se počet stupňů volnosti zvyšuje na tři. Zadávané parametry jsou tedy množství odpadu, výhřevnost odpadu a množství exportované páry do Teplárny Liberec.



Obr. 36 Bodové grafy závislosti exportu páry na výrobě páry v jednotlivých měsících

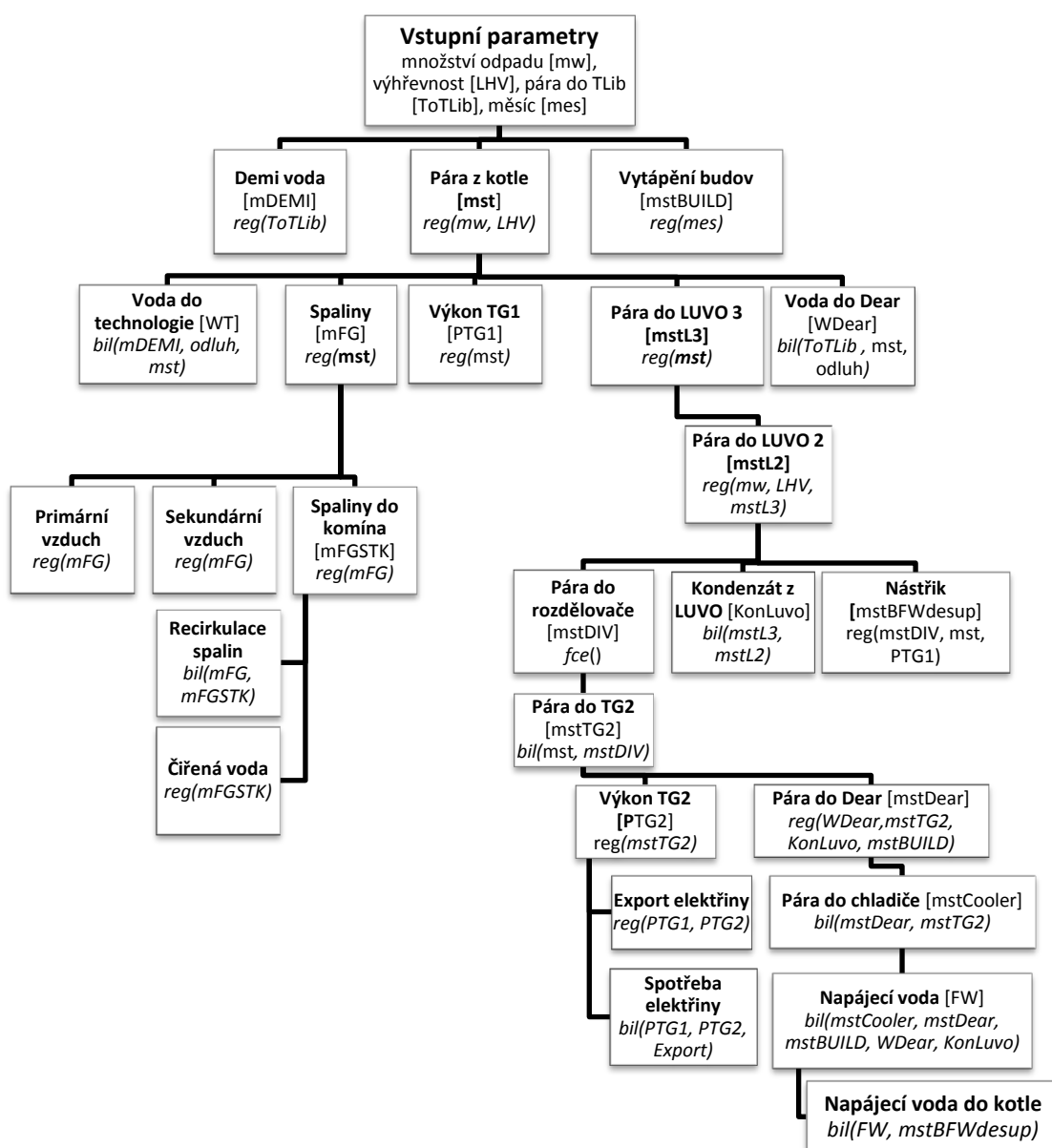
Postup při modelování předešlých uzlů je pro ukázkou tvorby modelů dostačující. Ostatní uzly byly vytvářeny obdobným způsobem a nejsou již zařazeny.

#### 4.4 Sestavení modelu celého systému a jeho ověření

Analýza dat ukázala, že předpokládaný odhad některých závislostí nebyl správný, ovšem na celkovou koncepci modelu to nemělo výrazný vliv. Výjimkou jsou modely výkonů TG1 a TG2, které byly zjednodušeny, čímž bylo odstraněno celkem šest proměnných ( $t_{in,TG1}$ ,  $P_{in,TG1}$ ,  $P_{out,TG1}$ ,  $t_{in,TG2}$ ,  $P_{in,TG2}$ ,  $P_{out,TG2}$ ) a jedna rovnice (rovnice (6.5)). Podíváme-li se nyní na stupně volnosti, tak máme celkem 21 proměnných, 18 rovnice a tedy  $21-18=3$  stupně volnosti. Aby byly rovnice, z nichž je model sestaven, řešitelné, je potřeba zadat tři proměnné – množství odpadu, výhřevnost a množství exportované páry do Teplárny Liberec.

Díky charakteru soustavy rovnic a topologii systému lze systém simulovat sekvenčně-modulárním přístupem. Tento přístup nelze použít vždy, což je prezentováno v kapitole 6, kde bylo nutné použít rovnicově orientovaný přístup. Výpočtový algoritmus je podrobně znázorněn v diagramu na obr. 37. V diagramu jsou znázorněny jednotlivé počítané parametry a postup jejich výpočtu. Diagram se skládá z bloků, které jsou uspořádány do jednotlivých úrovní. Na každé úrovni jsou jednotlivé proměnné závislé pouze na parametrech, které jsou v úrovních vyšších. V blocích je pak tučně uveden název proměnné a v hranaté závorce uvedena zkratka, která slouží k následnému odkazování. Dále jsou v blocích uvedeny v kulaté závorce na druhém (popř. třetím) řádku parametry, na kterých je daná proměnná závislá, a před touto závorkou je uvedeno označení buď *reg*, nebo *bil*. Toto označení znamená, že daný parametr se počítá buď pomocí regresní funkce (označeno *reg*) nebo z bilančního výpočtu (označeno *bil*).

Ověření modelu proběhlo dvojím způsobem a to ověřením pomocí provozních dat a ověřením platnosti bilancí v softwaru W2E.



Obr. 37 Schéma výpočtového algoritmu celkového modelu TERMIZO



#### 4.4.1 OVĚŘENÍ MODELU NA PROVOZNÍCH DATECH

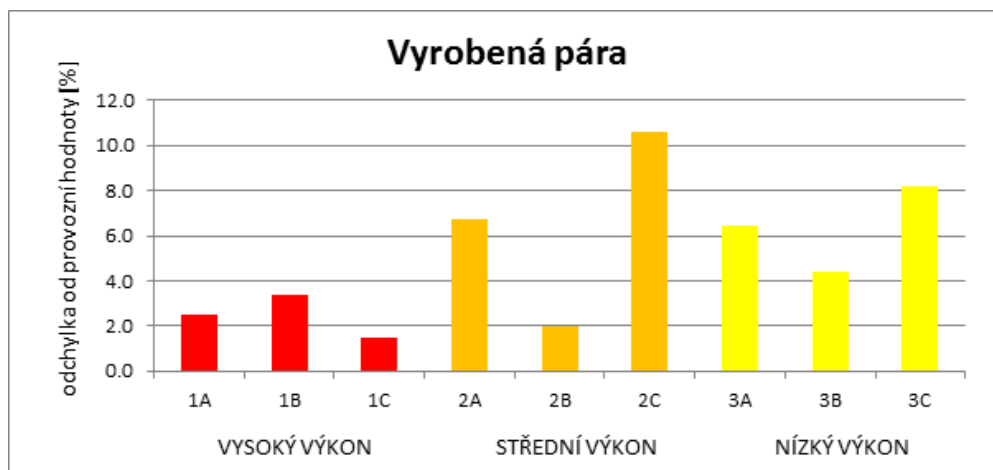
Platnost modelu byla ověřována v celém rozsahu výkonů. Byla vybrána tři výkonová pásma: produkce páry více jak 39 t/h, produkce páry 32 až 36 t/h, produkce páry méně jak 27 t/h.

Pro každé pásmo byly v provozním deníku nalezeny tři datové sady s ustálenými stavy, tedy delší časové intervaly (12 až 48 hodin) s minimálními změnami výkonu v daném intervalu. Ověření bude ukázáno pouze na jedné datové sadě pro pásmo středního výkonu. Výsledky jsou v tab. 17.

Tab. 17 Výsledky srovnání modelu s provozními daty

parametr	jednotka	Datová sada pro střední výkon			poznámka
		modelová hodnota	provozní hodnota	odchylka [%]	
Dávkování odpadu	(t/h)	11,5		-	VSTUPNÍ HODNOTY
Výhřevnost	(GJ/t)	10,3		-	
Export páry do Teplárny Liberec	(t/h)	29,5		-	
Vyrobena pára	(t/h)	36,0	35,3	2,0	
Výkon TG1	(kW)	2216,6	2160,1	2,6	
Dodávka el. do Teplárny Liberec	(kW)	800,6	861,5	-7,1	
Pára do LUVO 3	(t/h)	1,1	1,0	6,1	
Napájecí voda	(t/h)	38,6	36,0	7,5	
Primární vzduch	(m <sup>3</sup> /h)	29261,5	29266,1	0,0	
Recirkulace spalín	(m <sup>3</sup> /h)	9195,2	9076,2	1,3	
Spaliny do komína	(m <sup>3</sup> /h)	69361,2	72193,5	-3,9	

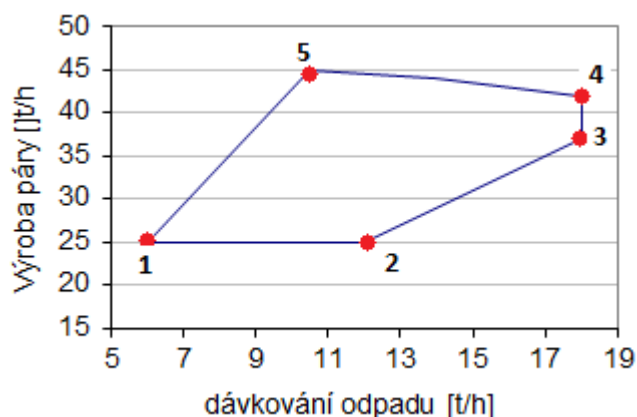
Je vidět, že model se v tomto případě proti naměřeným hodnotám vychyluje maximálně o 7,5 %. V dalších datových sadách jsou většinou výsledky obdobné. Pouze v některých případech dochází k větším odchylkám u jednotlivých parametrů. Ovšem jde o ekonomicky málo významné parametry. Obr. 38 ukazuje odchylku u výroby páry pro všechny datové sady.



Obr. 38 Odchylka výroby páry pro všechny datové sady

#### 4.4.2 OVĚŘENÍ MODELU POMOCÍ BILANČNÍHO SOFTWARE W2E

Jako vstupní hodnoty pro bilanční model sestavený v prostředí W2E byly stanoveny hodnoty na základě výkonového digramu spalovacího roštu sestaveného z provozních dat (zvýrazněné body v obr. 39). Srovnání bude ukázáno pouze na bodě 3. Výsledky srovnání uvádí tab. 18.



Obr. 39 Diagram spalovacího roštu

Tab. 18 Výsledky srovnání modelu s výstupy z W2E

parametr	jednotka	BOD3		
		Výpočtový model	W2E	odchylka [%]
Pára z kotle na turbínu	(t/h)	37,2	37,0	<b>0,5</b>
Pára na TG2	(t/h)	16,5	16,3	<b>1,2</b>
Výkon TG1	(kW)	2306,9	2251,5	<b>2,5</b>
Výkon TG2	(kW)	765,7	791,4	<b>-3,3</b>
Pára do rozdělovače	(t/h)	20,7	20,8	<b>0,5</b>
Zástřík za turbínou	(t/h)	0,6	0,6	<b>0,0</b>
Pára z bubnu do LUV03	(t/h)	1,0	1,1	<b>9,0</b>
Pára do LUV02	(t/h)	1,3	1,2	<b>8,3</b>
Pára odplynění	(t/h)	3,1	3,0	<b>3,3</b>
Pára pro vytápění	(t/h)	1,8	1,8	<b>0,0</b>
Nutno mařit	(t/h)	11,7	11,5	<b>1,7</b>
Kondenzát z LUV0	(t/h)	2,3	2,3	<b>0,0</b>
Napájecí voda	(t/h)	39,6	38,7	<b>2,3</b>
Napájecí voda do Kotle	(t/h)	39,0	38,1	<b>2,3</b>
Primární vzduch	(m <sup>3</sup> /h)	29820,9	29625,0	<b>0,6</b>
Recirkulace spalin	(m <sup>3</sup> /h)	9377,0	11236,8	<b>-16,6</b>
Spaliny do komína	(m <sup>3</sup> /h)	70974,8	67340,2	<b>5,4</b>

Je vidět, že bilančně model vyhovuje. Odchylky vyskytující se v případě TG1 a TG2 souvisí s variabilitou modelu, popisujícího výkon TG1 nebo TG2 na množství zpracované páry, a jsou způsobeny rozdílnou vnitřní termodynamickou účinností turbín. Větší

odchylky u parametrů s nízkými absolutními hodnotami jsou větší z důvodu zaokrouhlování.

Validace modelu potvrdila, že ve většině provozních ukazatelů je dosahováno velmi dobré shody mezi naměřenými daty a simulačním modelem. Pomocí modelu sestaveného v softwaru W2E bylo ověřeno, že i po bilanční stránce je simulační model platný.

Velmi kvalitní modely byly nalezeny pro tyto uzly:

- uzel výroby páry
- uzel výroby elektřiny na TG1
- uzel výroby elektřiny na TG2
- uzel exportu elektřiny a vlastní spotřeby elektřiny
- uzel předehřevu vzduchu.

Index determinace u těchto modelů je minimálně 0,85, ve většině případů se jedná o hodnoty nad 0,90. Je potřeba podotknout, že právě tyto uzly jsou z pohledu finančních efektů nejvýznamnější.

Méně kvalitní modely, ale stále, dle indexu determinace, vyhovující jsou:

- Uzly s proudem spalin
- Uzly s proudem spalovacího vzduchu.

Modely uzlu s proudem spalin měly index determinace více jak 0,76. U modelu pro množství primárního spalovacího vzduchu je hodnota indexu determinace 0,70. Výjimkou je pouze model pro množství sekundárního vzduchu, kde je hodnota indexu determinace pouze 0,43.

Modely, jejichž index determinace byl nižší, jak 0,70 jsou:

- Množství čířené vody
- Množství demi vody
- Zástřík páry za prvním stupněm expanze.

U těchto modelů se vypočítaná hodnota může výrazněji lišit od naměřené. Avšak výsledky z těchto uzlů nemají na ekonomiku provozu příliš významný vliv a tudíž je tento nedostatek akceptovatelný.

U dalších modelů, které nevychází z provozních dat, nelze stanovit jejich kvalitu právě z důvodu nemožnosti porovnání s naměřenými hodnotami.

Vzhledem k účelu simulačního modelu je jeho kvalita velmi dobrá. Nedostatky, které se vykytují, mají na celkovou kvalitu minoritní vliv. Na dosud vytvořený model lze navázat ekonomické parametry provozu, čímž vznikne technicko-ekonomický model celého zařízení.

## 4.5 Technicko-ekonomický model a jeho využití

Posledním krokem je doplnění modelu o ekonomické parametry. Účelem vytvořeného modelu je na základě předchozího vyčíslení bilance zařízení vyhodnotit vliv různých provozních režimů zahrnujících různý zpracovatelský výkon, dodávku páry do Teplárny Liberec, využití druhého stupně turbíny a následného maření tepla na ekonomiku provozu. Tak bude možno hodnotit např. způsob provozování při snížené dodávce páry do Teplárny Liberec, kdy je možné buď udržet plnou zpracovatelskou kapacitu zařízení a přebytkové teplo mařit, nebo snížit zpracovatelskou kapacitu tak, aby výroba tepla odpovídala dodávce do teplárny.

Vzhledem k vytyčenému účelu byly v modelu zahrnuty následující položky (příjmy a variabilní náklady), které jsou více či méně závislé na způsobu využití tepla:

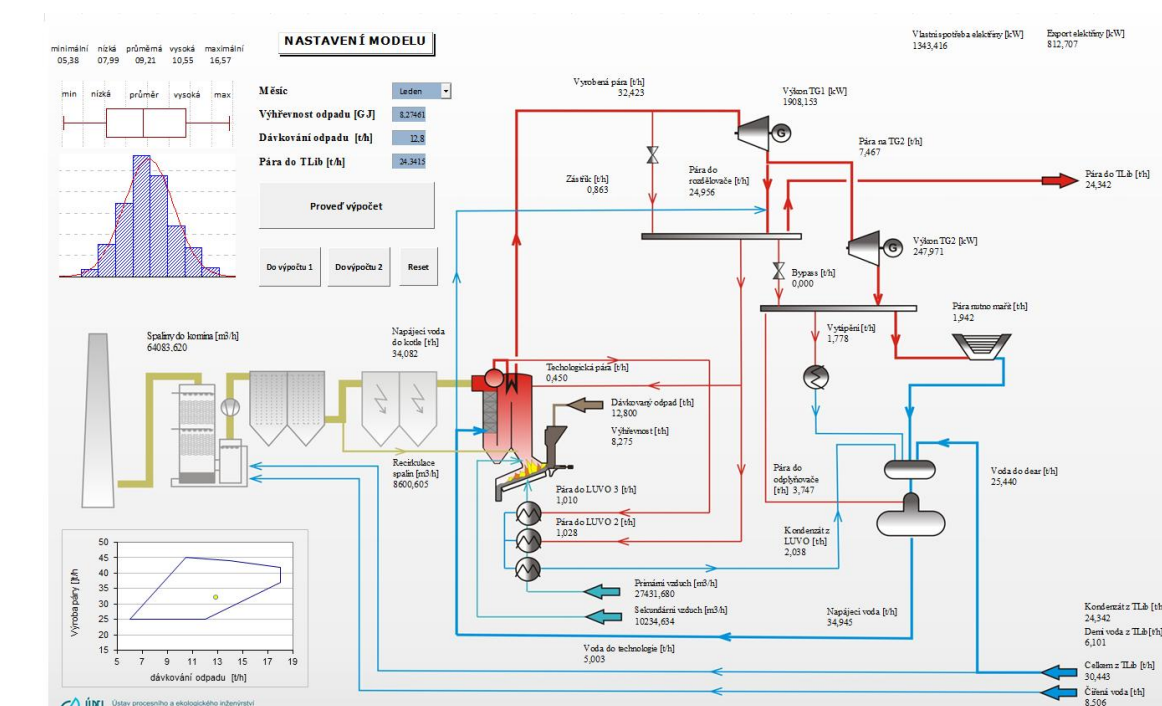
- příjem za zpracování odpadu
- příjem za prodej tepla
- příjem za prodej silové elektřiny
- příjem za uplatnění příspěvků k ceně elektřiny (KVET- kombinovaná výroba tepla a elektřiny, DZE - spalování druhotných zdrojů energie)
- náklady na demi-vodu.

Dále jsou zahrnuty rovněž některé variabilní položky, které nejsou přímo závislé na způsobu využití tepla, ale dominantně na zpracovatelské kapacitě, resp. výrobě tepla v kotli. Jedná se zejména o:

- náklady na čiřenou vodu
- náklady na chemické látky.

Tyto náklady byly do ekonomického modelu souhrnně zadány v souladu s praxí monitoringu a hodnocení na předmětné spalovně, tj. jako měrné vztažené na tunu zpracovaného odpadu resp. tunu vyrobené páry.

Model byl implementován v prostředí MS Excel s využitím programovacího jazyka VBA. Uživatelské prostředí je rozděleno na dvě části – schéma zařízení s hlavními provozními ukazateli (obr. 40) a detailní přehled všech provozních a ekonomických parametrů. Model lze použít například ke srovnání různých provozních stavů, k posouzení vlivu změny provozního výkonu na tržby a náklady, atd.

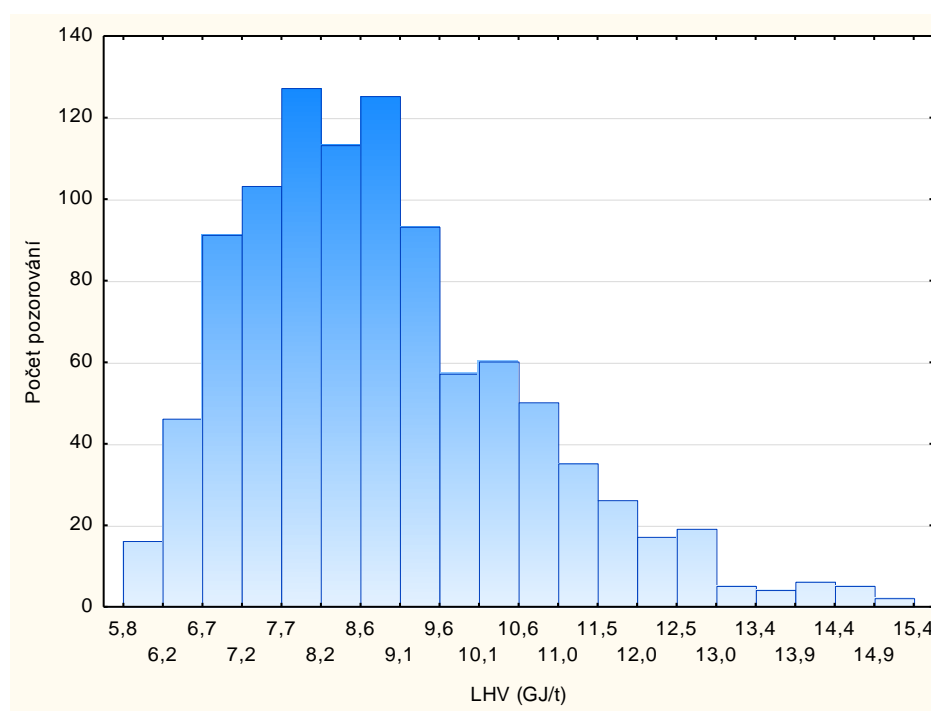


Obr. 40 Schéma zařízení s hlavními ukazateli – implementace v MS Excel

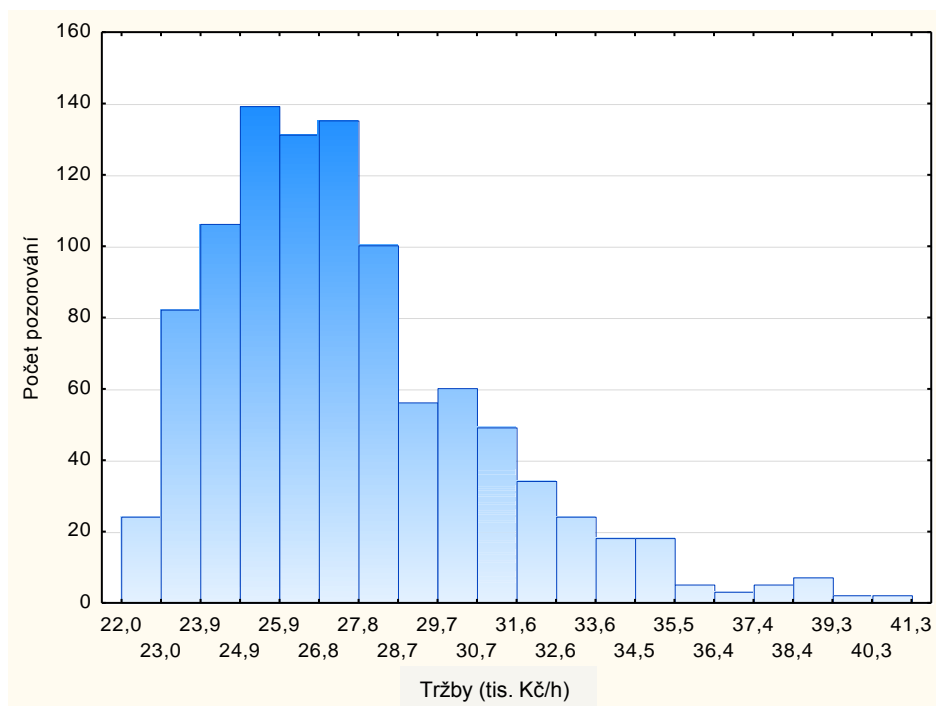
Jak již bylo zmíněno, v modelu se vyskytuje náhodná proměnná – výhřevnost. Při simulaci stochastických systémů lze použít různé techniky, např. metodu Monte Carlo (viz kapitola 6.3.1). Použití tohoto přístupu bude demonstrováno na příkladu, kdy chce

provozovatel znát, s jakou pravděpodobností budou tržby vyšší jak 25 tis Kč/h v průměrném lednovém dnu, bude-li spalovat průměrně 11,8 t/h odpadu. Z grafu na obr. 36 je vidět, že v lednu je dodávka páry do teplárny závislá na vyrobené páře, je tedy přizpůsobena provoznímu stavu. Provozní stav je dán množstvím dávkovaného odpadu a jeho výhřevností. Výhřevnost zde ale není určena jedinou hodnotou, nýbrž pravděpodobnostním rozdělením. To je znázorněno na obr. 41. Toto rozdělení lze aproximovat log-normálním rozdělením. Pro simulaci bylo vygenerováno tisíc hodnot výhřevnosti právě z tohoto aproximovaného rozdělení. Vygenerované hodnoty se pak použily jako vstupní parametr k výpočtům. Tím bylo získáno tisíc hodnot pro tržby. Jak se dalo předpokládat, po zobrazení histogramu tržeb (obr. 42) je vidět, že tvarem se podobá histogramu výhřevnosti. V tomto případě jde o poměrně jednoduchý stochastický systém, ovšem v případě více náhodných proměnných nebo v případě složitějších rozdělení pravděpodobnosti nelze výsledek dopředu odhadovat. Nyní je snadné spočítat pravděpodobnost, se kterou budou tržby vyšší jak 25 tis. Kč/h. Názorně je to pak zřejmé z grafu distribuční funkce tržeb (obr. 43), kde je vidět, že výše tržeb do hodnoty 25 tis. Kč/h má asi 20 % pravděpodobnost, jinak řečeno s pravděpodobností 80 % budou tržby více jak 25 tis. Kč/h.

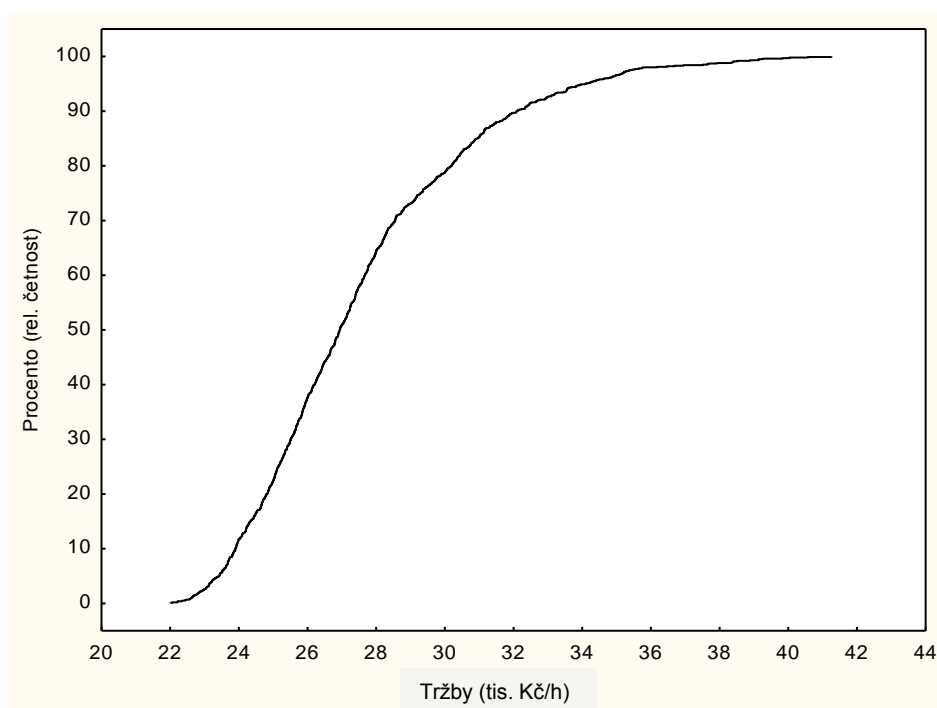
Analogicky lze postupovat při vytváření simulačního modelu i dalších energetických zdrojů, nejen zařízení na energetické využití odpadů. Simulační model lze dále upravit na model optimalizační tím, že se některé vstupní parametry modelu nezadávají, ale ponechají se jako proměnné. Jinými slovy, počet stupňů volnosti bude větší jak nula.



Obr. 41 Histogram výhřevnosti v měsíci lednu



Obr. 42 Histogram tržeb



Obr. 43 Distribuční funkce tržeb

## 5. OPTIMALIZACE PALIVOVÉ ZÁKLADNY TEPLÁRENSKÉHO PROVOZU VYUŽÍVAJÍCÍHO UHLÍ A BIOMASOVÁ PALIVA

Postup při využití matematické optimalizace bude prezentován na případové studii plánování provozu teplárny využívající více typů paliv. Formulaci optimalizační úlohy předchází vytvoření technicko-ekonomického optimalizačního modelu zařízení. Kroky při vytváření takového modelu jsou analogické s těmi, které byly detailněji popsány v předchozí kapitole, a proto zde budou uvedeny pouze nejdůležitější závěry této fáze. Hlavní pozornost bude věnována následné optimalizaci. Případová studie má za cíl přispět k finančně přijatelné integraci biomasových paliv v teplárenském provozu. Na závěr bude uveden obecný optimalizační model teplárenského provozu využívajícího více druhů paliv, který vznikl na základě řešené případové studie.

### 5.1 Popis modelové teplárny

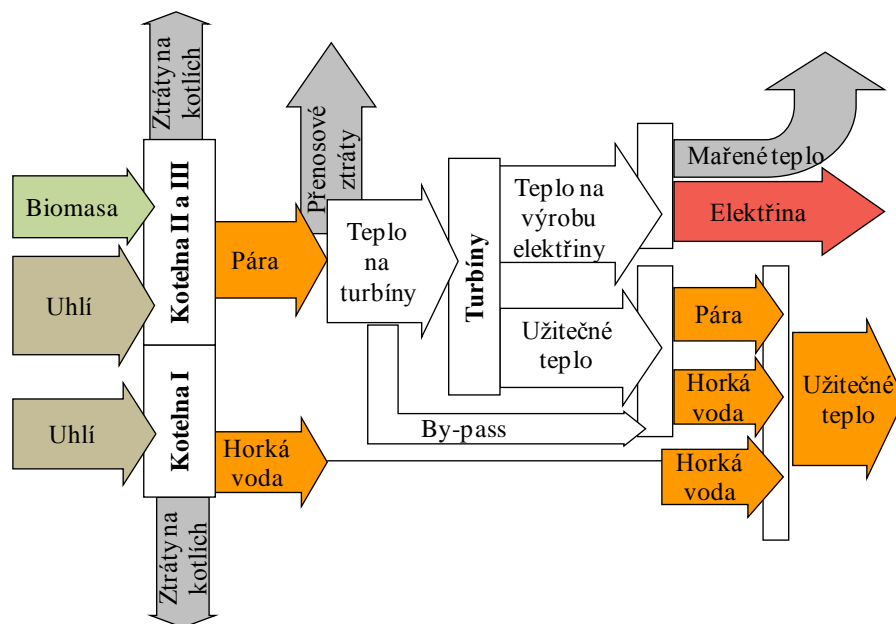
Předmětem případové studie je teplárna, která současně vyrábí teplo a elektřinu (tzv. kogenerace). Primárním palivem je hnědé uhlí a dále se spolu s uhlím spaluje v kotlích také biomasa. Teplárna má tři kotelný. V kotelně I jsou instalovány dva horkovodní kotle každý o výkonu 34,8 MW<sub>t</sub> se spalovacím roštovým zařízením. Tyto kotle jsou provozovány pro pokrytí špičkových nebo havarijních stavů jako studená záloha. V kotelně II jsou instalovány dva granulační parní kotle pro spalování hnědého uhlí, každý o výkonu 128 MW<sub>t</sub>. V kotelně III je instalován jeden fluidní kotel o výkonu 128 MW<sub>t</sub>, jehož hlavní částí je fluidní lože, do něhož je dopravováno palivo a drcený vápenec. To umožňuje nejen řádné vyhoření paliva, ale také postupně snižuje vznik škodlivých oxidů dusíku a síry a jejich úniku do ovzduší. Kotle v kotelnách II a III umožňují spoluspalování biomasy a uhlí. Pára vyrobená v kotelně II a III je vedena do strojovny, kde se na parních turbínách generuje elektřina. Ve strojovně je instalována jedna protitlaká turbína o jmenovitém výkonu 67 MW<sub>e</sub> a jedna kondenzační odběrová turbína o jmenovitém výkonu 50 MW<sub>e</sub>. Blokové schéma s toky energie je znázorněno na obr. 44.

### 5.2 Technicko-ekonomický model pro optimalizační úlohu

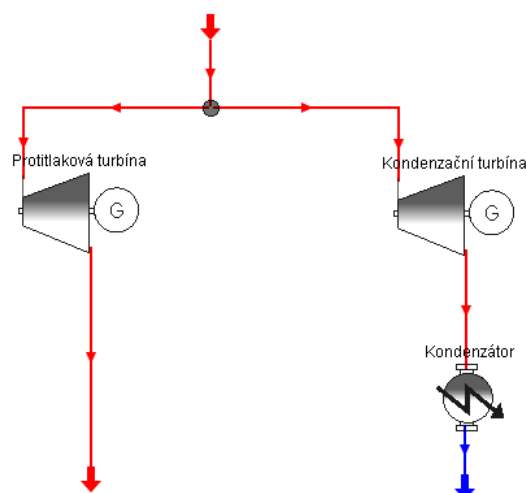
Nejprve je tedy potřeba sestavit model, který bude využit při optimalizaci. Model je navržen tak, aby vyhodnotil provozní podmínky s ohledem na poptávku po teple a elektřině. Oproti modelu prezentovanému v kapitole 4, který byl navržen pro simulaci aktuálního provozního stavu, má tento model sloužit spíše pro koncepční hodnocení provozu. Hodnotí tedy delší časové období, konkrétně provoz na jeden rok s délkou časového kroku jeden měsíc (tj. model vyhodnocuje provoz pro každý měsíc zvlášť). Z pohledu samotné technologie má model tři hlavní části: parní a horkovodní kotle, parní turbíny a využití vyrobené energie (viz obr. 44). Vstupní energie, obsažena v palivech, je v kotli předána napájecí vodě a vyrábí se pára. Pára je poté vedena na turbíny, kde se generuje elektrická energie a vyrábí se teplo. Část vyrobených energií je spotřebována ve vlastním provozu, zbytek je exportován do sítě. Zároveň se samozřejmě uvažují energetické ztráty kotle a energetické ztráty na turbínách. Při popisu modelu je využit algebraický zápis, proto jsou pro model definovány množiny klíčových prvků.

První množinou je množina časových období  $T$ , která obsahuje měsíce v roce, tedy prvky  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{12}\}$ . Další množinou je množina paliv  $J$ . Ta obsahuje všechny typy paliv, které se v provozu využívají. Kromě uhlí jsou to další biomasová paliva dostupná u lokálních výrobců. Palivový mix teplárny se skládá z uhlí (ozn.  $ju$ ), dřevní štěpky (ozn.  $jds$ )

a dalších paliv na bázi odpadní biomasy z různých průmyslových procesů, která nejsou na základě dohody s poskytovatelem údajů blíže specifikována (ozn.  $jpm$ ,  $jcr$ ,  $jv$ ,  $jp$ ,  $jpf$ ). Množina paliv je tedy  $J = \{ju, jds, jpm, jcr, jv, jp, jpf\}$ . Dále jsou zde množiny kotlů a turbín. Ačkoliv mají kotelní I a II více kotlů, provozní data nerozlišují jednotlivé kotle, a proto jsou kotelní uvažovány jako jeden kotel. Kotelny I, II a III jsou označeny jako  $k_1, k_2, k_3$  a množina kotlů je tedy  $K = \{k_1, k_2, k_3\}$ . Podobná situace je i v případě množiny turbín. Ačkoliv jsou instalovány dvě turbíny (viz obr. 45), provozní data opět nerozlišují mezi jednotlivými turbínami (jsou k dispozici pouze údaje o výrobě elektřiny a tepla ve strojovně), proto jsou obě turbíny uvažovány jako celek. Množina turbín  $P$  má tedy pouze jeden prvek  $P = \{p_1\}$ . Vzhledem k tomuto je zbytečné, aby byl tento index při dalším zápisu uváděn, a proto je dále vynecháván.



Obr. 44 Blokové schéma modelového teplotěrenského provozu



Obr. 45 Schéma zapojení turbín



Poslední množinou je množina energií, která má vždy dva prvky, teplo  $mh$  a elektřinu  $me$ , tedy  $M = \{mh, me\}$ . S využitím těchto pěti množin je sestaven model.

### 5.2.1 HORKOVODNÍ A PARNÍ KOTLE

Jako první je standardním způsobem vypočítána energie vnesená palivy  $u_{j,k,t}$ :

$$u_{j,k,t} = x_{j,k,t} \cdot \xi_j, \quad (7.1)$$

kde  $x_{j,k,t}$  je množství paliva typu  $j$  dávkovaného do kotle  $k$  v měsíci  $t$  a  $\xi_j$  je výhřevnost paliva  $j$ .

Dále teplo předané vodě/páře je vypočítáno pomocí účinnosti kotlů. Na účinnost kotle má vliv mnoho faktorů jako zatížení, podíl spoluspalované biomasy, atd. V případě kotleny I nebylo k dispozici potřebné množství dat, proto je v modelu použita průměrná účinnost. Pro kotleny II a III byl pomocí regresní analýzy nalezen model vyhodnocující účinnost kotlů v závislosti na několika faktorech (detailně popsáno v [76]). Ale protože provozní data pochází z doby, kdy se spalovala pouze dřevní štěpka, není možné vyhodnotit vliv ostatních biomasových paliv na účinnost. Proto se i pro tyto kotleny používá průměrná hodnota.

$$\eta_{k1} = 67\%$$

$$\eta_{k2} = 84\%$$

$$\eta_{k3} = 89\%$$

Pomocí standardní rovnice je pak vypočítána energie předaná vodě/páře  $v_{j,k,t}$ :

$$v_{j,k,t} = u_{j,k,t} \cdot \eta_k. \quad (7.2)$$

Kotle jsou samozřejmě omezeny svou kapacitou:

$$\sum_{j \in J} u_{j,k,t} \leq b_{k,t}, \quad (7.3)$$

kde  $b_{k,t}$  je maximální měsíční kapacita kotlů daná nominálním výkonem násobeným počtem disponibilních provozních hodin v daném měsíci. Kromě toho je zde i další omezení a to na podíl spoluspalované biomasy. Tato omezení jsou vyjádřena buď energetickým poměrem nebo hmotnostním poměrem biomasy ku uhlí. V případě kotleny II je to maximálně 10 % množství uhlí, v případě kotleny III je to maximálně 40 % energie vnesené uhlím. Kotel v kotelně III není tak striktně omezen jako kotle v kotelně II. To je dáno použitou technologií. Fluidní kotel umožňuje spalování široké škály paliv efektivně a s nízkými emisemi. Tato vlastnost je demonstrována v práci [29], kde je srovnáno několik technologií. Další vhodnou technologií pro spoluspalování uhlí a biomasy jsou práškové kotle, jejichž vlastnosti při spalování jsou zkoumány v práci [77].

Za účelem formulace těchto omezení je zavedena podmnožina množiny paliv obsahující pouze biomasová paliva  $JB = \{jds, jpm, jcr, jv, jp, jpf\}$ ,  $JB \subset J$ . Omezení jsou pak ve tvaru:

$$0.1 \cdot \sum_{j \in JB} x_{j,k,2,t} \leq x_{ju,k,2,t}, \quad (7.4)$$

$$0.4 \cdot \sum_{j \in JB} x_{j,k,3,t} \cdot \xi_j \leq x_{ju,k,3,t} \cdot \xi_{ju}. \quad (7.5)$$

U modelu kotlů uvedeme omezení, které zohledňuje roční dostupné množství paliv  $a_j$ . Toto omezení vlastně propojuje jednotlivé měsíce a z toho důvodu je nutné řešit úlohu jako celek pro všechny měsíce, nikoliv pro každý měsíc zvlášť.

$$\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} x_{j,k,t} \leq a_j. \quad (7.6)$$

### 5.2.2 PARNÍ TURBÍNY

Vzhledem k tomu, že kotle v kotelně I nevyrábí páru ale pouze horkou vodu, je nezbytné pro další popis definovat množinu kotlů, které vyrábí páru využitou ve strojovně. To jsou kotle z kotelen II a III, množina má tedy dva prvky  $KT = \{k2, k3\}$ ,  $KT \subset K$ . Nyní lze formulovat vztah pro výpočet množství energie obsažené v páře vedené do strojovny  $w_t$ :

$$w_t = \sum_{j \in J} \sum_{k \in KT} v_{j,k,t}. \quad (7.7)$$

Tato energie je přeměněna na elektřinu a teplo. Vztah mezi energií přivedenou na turbíny a výrobou tepla a elektřiny lze vyjádřit pomocí funkce dvou proměnných. Pomocí regresní analýzy byly nalezeny dva vhodné modely – lineární a kvadratický. Kvadratický model je jen o málo přesnější (dle indexu determinace) a proto je preferován lineární model ve tvaru:

$$w_t = 0.26 \cdot y_{m=th,t} + 9.73 \cdot y_{m=me,t} + 61.44 \text{ (TJ)}, \quad (7.8)$$

kde  $y_{m=th,t}$  je množství vyrobeného tepla a  $y_{m=me,t}$  je množství vyrobené elektřiny.

Jednoduše pak lze vypočítat množství mařeného tepla a ztráty  $y_t^-$ :

$$w_t = \sum_{m \in M} y_{m,t} + y_t^-. \quad (7.9)$$

Zbývá už jen omezení na kapacitu turbín dané maximálním zatížením, které je 800 TJ. Omezení je tedy ve tvaru:

$$w_t \leq 800. \quad (7.10)$$

### 5.2.3 VYUŽITÍ VYROBENÉHO TEPLA A ELEKTŘINY

Vyrobené teplo a elektřina jsou z části využity pro vlastní spotřebu a zbytek je exportován do sítě. Vlastní spotřebu elektřiny  $y_{me,t}^{sc}$  lze dobře odhadnout na základě celkové výroby tepla. Jako v případě turbín i zde je index determinace pro model ve tvaru kvadratického polynomu jen o málo vyšší než pro lineární model. Proto je preferován model lineární:

$$y_{me,t}^{sc} = 0.01 \cdot \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} v_{j,k,t} + 1.52 \text{ (GWh)}. \quad (7.11)$$

Odhad vlastní spotřeby tepla  $y_{th,t}^{sc}$  vychází z množství exportovaného tepla  $y_{th,t}^{ex}$ , protože poptávka po teple reflektuje topné období. I zde je kvadratický model o málo lepší než model lineární:

$$y_{mh,t}^{sc} = 0.02 \cdot y_{mh,t}^{ex} - 1.16 \text{ (TJ)}. \quad (7.12)$$

Pro teplo, resp. elektřinu, musí platit energetická bilance. Tedy součet exportované elektřiny, resp. tepla, a vlastní spotřeby elektřiny, resp. tepla, se rovná vyrobené elektřině, resp. teplu. Vzhledem k tomu, že kotle v kotelně I nepřispívají k výrobě páry, je potřeba pro formulaci energetické bilance zavést jednotkový vektor  $\mathbf{e} = (e_m)_{m \in M}$ , který rozlišuje mezi teplem a elektřinou  $\mathbf{e} = (1, 0)$ . Bilance je pak dána rovnicí:

$$e_m \cdot v_{jc,k1,t} + y_{m,t} = y_{m,t}^{sc} + y_{m,t}^{exp}. \quad (7.13)$$

Tímto je popsána technická část modelu. Nyní se zaměříme na ekonomickou část.

### 5.2.4 EKONOMICKÉ PARAMETRY PROVOZU

V ekonomickém modelu se budeme zabývat pouze variabilními příjmy a náklady. Fixní položky nejsou ovlivněny provozem a jsou z hlediska řešeného problému nepodstatné. Nejprve se budeme zabývat příjmy teplárny. Hlavní zdroj příjmů je z prodeje elektřiny a tepla:

$$I_E = \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} y p_m \cdot y_{m,t}^{exp}, \quad (7.14)$$

kde  $y p_m$  je jednotková cena za teplo, resp. elektřinu.

K elektřině se váží další příjmy teplárny. Prvním z nich je příplatek k elektřině z kombinované výroby elektřiny a tepla (KVET). V roce 2004 přijala EU směrnici na podporu kombinované výroby elektřiny a tepla. V případě ČR je tato podpora řešena formou příplatků k takto vyrobené elektřině. V souladu s legislativou[78] je příjem z příplatku k elektřině z KVET dán vztahem:

$$I_{KVET} = \sum_{t \in T} (y_{mh,t} - e_m \cdot v_{jc,k1,t}) \cdot 0,29, \quad (7.15)$$

kde konstanta 0,29 udává poměr elektřiny ku vyrobenému teplu na turbínách a je dána tabulkově dle parametrů páry na vstupu a výstupu z turbíny.

Další příjem související s výrobou elektřiny, je příjem ze zelených bonusů, které se váží na elektřinu vyrobenou z OZE. Vzhledem k tomu, že biomasová paliva jsou většinou dražší než primární zdroje, vznikají různé podpůrné prostředky na výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů. V ČR je od roku 2005 zaveden systém zelených bonusů – příplatků k energii vyrobené z obnovitelných zdrojů. Výpočet příjmu ze zelených bonusů je již složitější. Vzhledem k tomu, že výše zelených bonusů  $y p_j^{RES-E}$  se liší podle typu paliva, je množství elektřiny vyrobené z každého typu paliva počítáno jako celkové množství zelené elektřiny  $y_{me,t}^{RES}$  násobené energetickým podílem každého paliva:

$$I_{RES-E} = \sum_{t \in T} \sum_{j \in JB} y p_j^{RES-E} \cdot \frac{u_j}{\sum_{j \in JB} u_j} \cdot y_{me,t}^{RES}. \quad (7.16)$$

Člen  $y_{me,t}^{RES}$  představuje množství elektřiny vyrobené z biomasových paliv. Výpočet tohoto množství vychází z legislativou daného vzorce [79] přeformulovaného pro potřeby modelu do následujícího tvaru :

$$y_{me,t}^{RES} = \frac{\sum_{j \in JB} \sum_{k \in KT} v_{j,k,t}}{\sum_{j \in J} \sum_{k \in KT} v_{j,k,t} - y_{mh,t}} \cdot (y_{me,t} - y_{me,t}^{sc}) \quad (7.17)$$

Dále existuje možnost příjmu z prodeje emisních povolenek. Teplárna využíváním biomasy šetří emisní povolenky na produkci CO<sub>2</sub>, protože biomasa se v tomto smyslu považuje za neutrální. Příjem z emisních povolenek je počítán jako rozdíl alokovaného množství CO<sub>2</sub>,  $aaCO_2$ , a vyprodukovaného CO<sub>2</sub>,  $spCO_2 \cdot \sum_k \sum_t x_{ju,k,t}$ , násobený cenou povolenky  $aCO_2p$ :

$$I_{CO_2} = aCO_2p \cdot \left( aaCO_2 - spCO_2 \cdot \sum_k \sum_t x_{ju,k,t} \right) \quad (7.18)$$

Tímto končí výčet hlavních příjmů teplárny. Nyní budou popsány náklady, z nichž nejvyšší jsou náklady na paliva. Výpočet je dán jako množství paliv  $x_{j,k,t}$  násobené jednotkovou cenou  $xp_j$ :

$$C_F = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} xp_j \cdot x_{j,k,t} \quad (7.19)$$

Další náklad tvoří likvidace popela. Vztah je dán takto:

$$C_A = adc \cdot \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} xa_j \cdot x_{j,k,t}, \quad (7.20)$$

kde  $adc$  je jednotková cena na likvidaci popela a  $xa_j$  je hmotnostní podíl popela v palivu.

Posledním významným nákladem je náklad na odsíření spalín. Zde je vztah pro výpočet trochu komplikovanější, protože v kotelnách I a II se používá CaO, zatímco v kotelně III se používá CaCO<sub>3</sub>. Jsou tedy zavedeny nové množiny  $KD = \{k1, k2\}$ ,  $KD \subset K$  a  $KW = \{k3\}$ ,  $KW \subset K$ . Pro výpočet je dán vztah:

$$C_S = CaOp \cdot scCaO \cdot \sum_{j \in J} \sum_{k \in KD} \sum_{t \in T} xs_j \cdot x_{j,k,t} \\ + CaCO_3p \cdot scCaCO_3 \cdot \sum_{j \in J} \sum_{k \in KW} \sum_{t \in T} xs_j \cdot x_{j,k,t}, \quad (7.21)$$

kde  $CaOp$  a  $CaCO_3p$  jsou jednotkové ceny CaO a CaCO<sub>3</sub>,  $scCaO$  a  $scCaCO_3$  jsou měrné spotřeby CaO a CaCO<sub>3</sub> na tunu síry a  $xs_j$  je hmotnostní podíl síry v každém palivu. Z provozních dat byly odhadnuty měrné spotřeby CaO a CaCO<sub>3</sub> jako 1.0 t<sub>CaO</sub>/t<sub>S</sub> a 8.1 t<sub>CaCO3</sub>/t<sub>S</sub>.

### 5.3 Formulace a implementace optimalizační úlohy

Nyní máme k dispozici technicko-ekonomický model vhodný pro formulaci požadované optimalizační úlohy. Cílem je nalézt optimální plán využití palivového mixu a optimální plán provozu ve smyslu výroby tepla a elektřiny tak, aby byl generován maximální zisk. Cílem není najít detailní, např. hodinový plán, ale spíše koncepční plán provozu. Uvažovaným časovým horizontem je jeden rok s časovým krokem jeden měsíc.

Konkrétně budeme hledat optimální dávku každého paliva do každého kotle v každém měsíci. Hodnotícím kritériem je tedy zisk teplárny daný vztahem:

$$z = I_E + I_{KVET} + I_{RES-E} + I_{CO2} - C_F - C_A - C_S \quad (7.22)$$

Ekonomická bilance je uváděna v EUR.

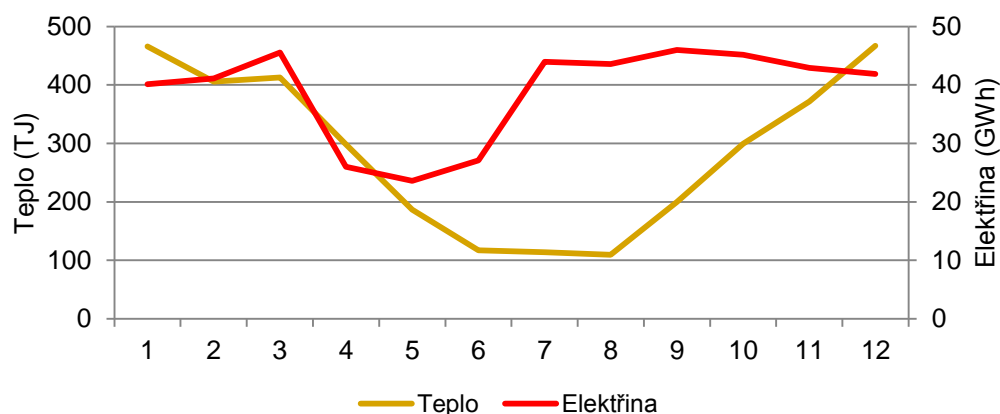
Jak již bylo zmíněno v části popisující technicko-ekonomický model teplárny, k dispozici je celkem sedm typů paliv. Hodnoty parametrů podstatných pro optimalizaci jsou uvedeny v tab. 19. Cena paliv není dána konkrétní hodnotou, ale pouze poměrnou cenou vztaženou na cenu uhlí. Je to z důvodu zachování obchodního tajemství teplárny.

Tab. 19 Parametry paliv

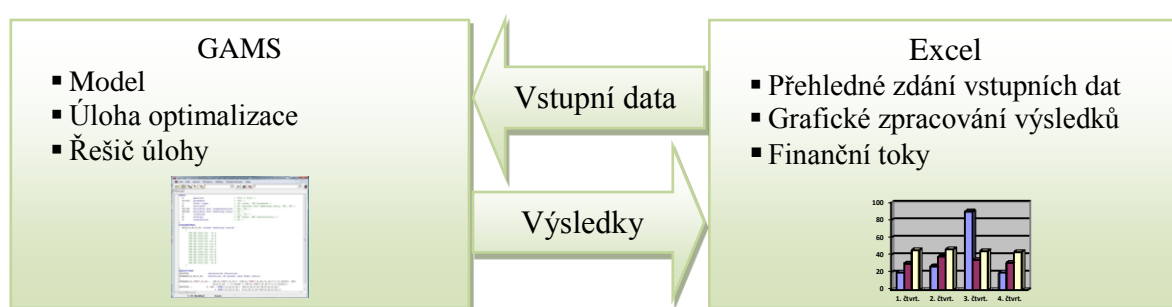
palivo	cena (-)	výhřevnost (GJ/t)	dostupnost (kt/rok)	bonus (€/GWh)	popeloviny (% hm.)	síra (% hm.)
$x_j$	$xp_j$	$\xi_j$	$a_j$	$yp_j^{RES-E}$	$xa_j$	$xs_j$
$jc$	1	13.8	bez limitu	0	11.5	0.6
$jwc$	2.7	12.1	70.0	27000	1.0	0
$jsg$	1.4	13.6	26.6	27000	2.3	0.1
$jsbp$	5.2	13.4	44.0	27000	11.1	0
$jrc$	4.7	16.6	25.0	27000	6.4	0.4
$jsc$	3.5	16.5	25.0	27000	6.5	0.4
$jfb$	1.6	14.1	7.7	20	6.9	0.5

Dále je nutné určit poptávku po teple a elektřině. Roční průběh poptávky je zobrazen v grafu na obr. 46. Tyto hodnoty jsou opět získány z provozních dat modelové teplárny. Splnění poptávky je v úloze zajištěno omezením na exportovanou elektřinu a teplo.

Optimalizační úloha je implementována v softwarovém prostředí GAMS (General Algebraic Modeling System), což je pokročilý modelovací systém pro účely matematického programování a optimalizace. Řešený problém je nelineární, viz rovnice (7.14) a (7.15). Pro řešení byl použit řešič nelineárních úloh CONOPT. Protože se GAMS blíží spíše programátorskému prostředí, bylo z různých důvodů vhodné vytvořit rozhraní tak, aby byla umožněna práce s modelem i uživatelům, kteří s GAMS nemají zkušenosti. Navíc je výpis výsledků z GAMS pouze v základní textové formě, což bylo dalším důvodem pro vytvoření uživatelsky přívětivějšího rozhraní. Pro tyto účely je velmi vhodným nástrojem program Microsoft Excel, který je používán většinou uživatelů. Tímto rozhraním jsou usnadněny jednak zadávání vstupních dat i lehčí modifikace modelu, jednak jsou výsledky převedeny do názornější podoby. Pomocí maker psaných v programovacím jazyce Visual Basic for Applications (VBA) jsou vygenerovány soubory se vstupními daty ve formátu, v němž lze data importovat do kódu psaného v prostředí GAMS. Po vyřešení úlohy lze opět přes makra psaná ve VBA načíst výsledky do prostředí Microsoft Excel (obr. 47). Toto uživatelské rozhraní bylo vytvořeno v rámci diplomové práce [80].



Obr. 46 Poptávka po teple a elektřině



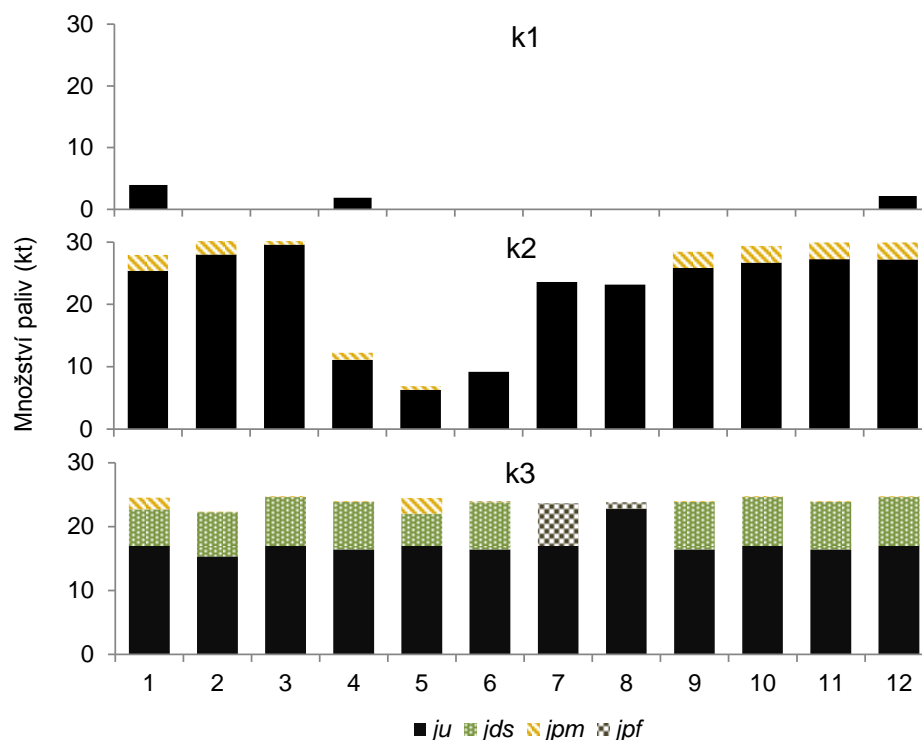
Obr. 47 Princip fungování uživatelského rozhraní v MS Excel a výpočtového jádra v GAMS

## 5.4 Využití optimalizačního modelu – výsledky optimalizace

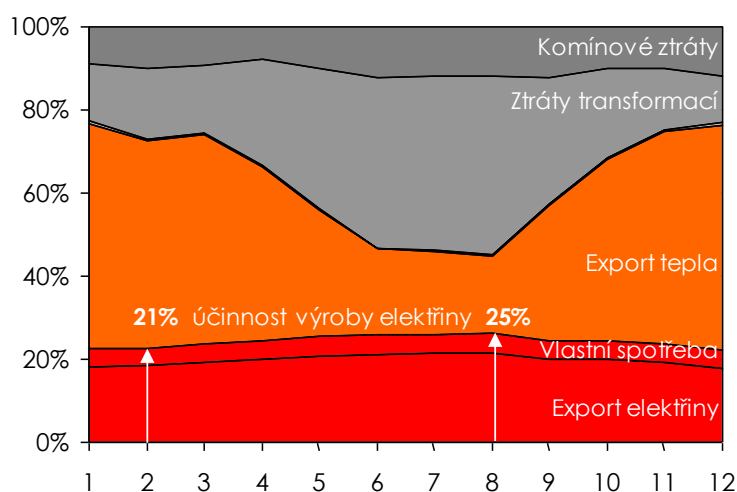
### 5.4.1 ZÁKLADNÍ ÚLOHA

Vstupní parametry základní úlohy jsou uvedeny v předchozí kapitole (tab. 19, obr. 46). Získaný plán optimálního využití paliv v jednotlivých měsících je uveden na obr. 48. Doporučená biomasová paliva jsou tedy dřevní štěpka, *jds*, a dále biomasová paliva označena jako *jpm* a *jpf*. U všech těchto paliv je využito celého dostupného množství. Ale celkově není vždy dosaženo technologického limitu kotlů (viz rovnice (7.3) a (7.4)). Cena nevyužitých paliv je tedy natolik vysoká, že ani zelené bonusy nezaručují ekonomickou výhodnost jejich využití. Zajímavé je rozložení dávkování paliv. Biomasová paliva jsou upřednostněna v zimních měsících, tedy v období s vyšší poptávkou po teple. Tento výsledek je spíše proti očekávání, protože účinnost výroby elektřiny je vyšší právě v letních měsících (viz obr. 49), kdy se více využívá kondenzační turbína. Po podrobnějším prozkoumání způsobu výpočtu množství zelené elektřiny je důvod zřejmý. Rovnice (7.15) je formulována tak, že čím je méně vyrobeného tepla na turbínách, tím méně je vypočítané zelené elektřiny. Jinými slovy rovnice udává, že energie z uhlí je přednostně využita na výrobu tepla. Tudíž v chladnějších měsících je podíl biomasy na výrobě elektřiny vyšší, protože větší množství energie z uhlí jde na výrobu tepla. Naopak v letních měsících není tak velké množství energie z uhlí pro výrobu tepla potřeba, a proto roste podíl energie z uhlí na výrobě elektřiny. Obr. 50 znázorňuje produkci elektřiny z uhlí a biomasových paliv. Efekt způsobu výpočtu zelené elektřiny je zde velice dobře pozorovatelný při srovnání měsíce září a říjen. Oba měsíce mají téměř shodné množství paliv (o málo nižší v září) a výrobu elektřiny (o málo vyšší v září). Avšak podíl zelené elektřiny na celkové

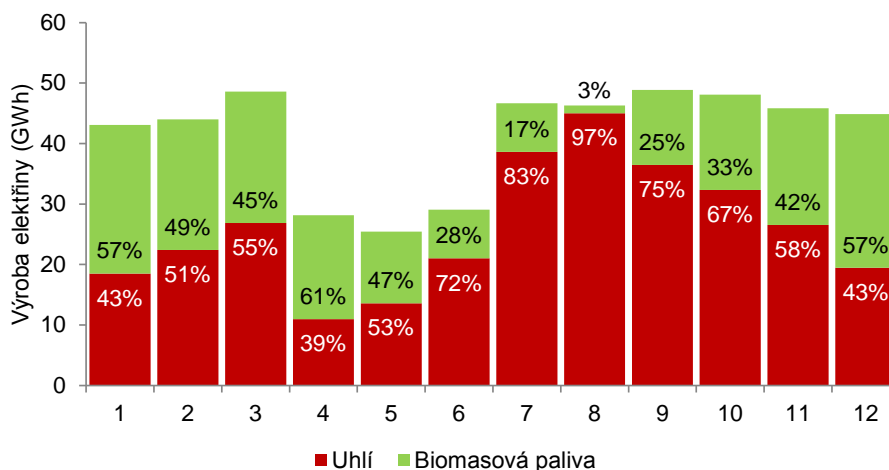
výrobě je v říjnu výrazně vyšší než v září. To je způsobeno výrazným nárůstem výroby tepla mezi měsíci září a říjen (cca o 100 TJ). Rozdíl ve vypočítaném množství zelené elektřiny je asi 3,4 GWh., což je okolo 0,1 M€. Efekt množství vyrobeného tepla na výpočet zelené elektřiny je demonstrován na obr. 51, jehož graf vychází z rovnice (7.15). Vstupní hodnoty odpovídají hodnotám pro měsíc únor: 510 TJ energie dodáno z uhlí, 110 TJ energie dodáno z biomasových paliv, 40 GWh export elektřiny. Vezmeme-li toto v úvahu, pak je přirozeně upřednostněno využití paliva *jpf* v letních měsících kvůli nižšímu zelenému bonusu. Co se týče provozu kotelný I, tak je vidět pokrytí pouze špičkových měsíců, kdy nedostačuje výroba tepla na turbínách.



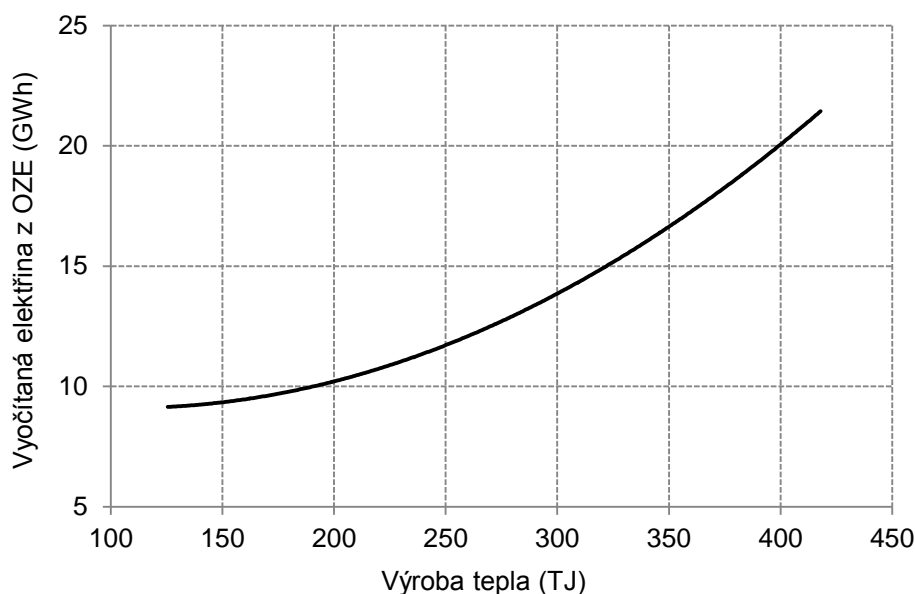
Obr. 48 Optimální plán dávkování paliv



Obr. 49 Využití energie paliv



Obr. 50 Podíl elektřiny z uhlí a elektřiny z biomasových paliv



Obr. 51 Závislost vypočítané elektřiny z biomasy na výrobě tepla

#### 5.4.2 ANALÝZA SCÉNÁŘŮ

Cílem analýzy scénářů je vyhodnocení ekonomického efektu, který plyne z využívání biomasy. Proto bude uvedeno porovnání těchto dvou scénářů:

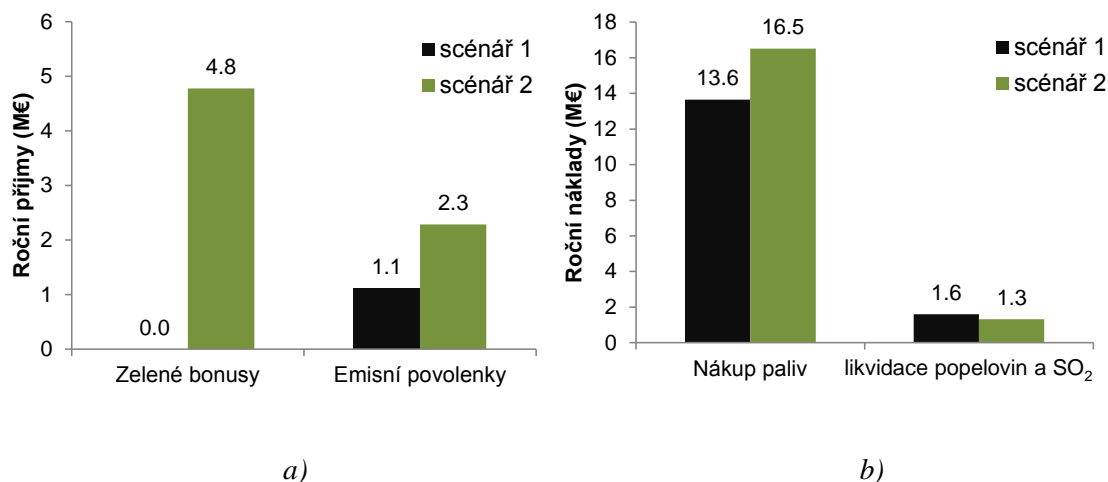
- scénář 1 – spalování pouze uhlí
- scénář 2 – spoluspalování uhlí a biomasy

Příjem z prodeje tepla a elektřiny a příplatky k elektřině vyrobené kogeneračním způsobem jsou shodné pro oba scénáře, tudíž budou při srovnání příjmů a nákladů vynechány. Grafy na obr. 52 a) a obr. 52 b) ukazují rozdíly mezi oběma scénáři.

Využití biomasy výrazně zvyšuje příjem ze zelených bonusů a prodeje emisních povolenek CO<sub>2</sub>. Co se týče nákladů, tak likvidace popelovin a SO<sub>2</sub> se snižují (biomasová paliva mají nižší obsah síry a popelovin než uhlí). Na druhé straně jsou ale náklady na nákup paliv výrazně vyšší. Celkový zisk pro scénář 1 je 28,8 M€, zatímco pro scénář 2 je to



29,2 M€. Rozdíl zhruba odpovídá rozdílu mezi nárůstem nákladů na nákup paliv a příjmem ze zelených bonusů.

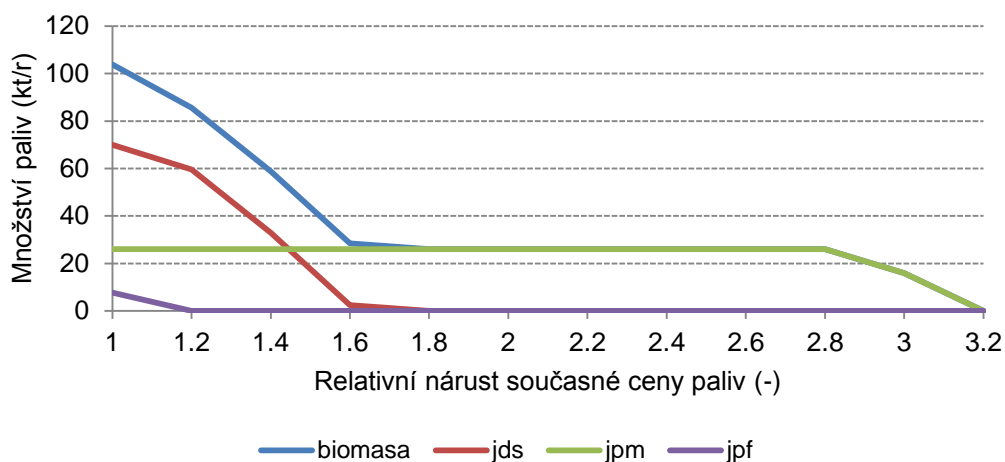


Obr. 52 Porovnání scénářů a) příjmy, b) výdaje

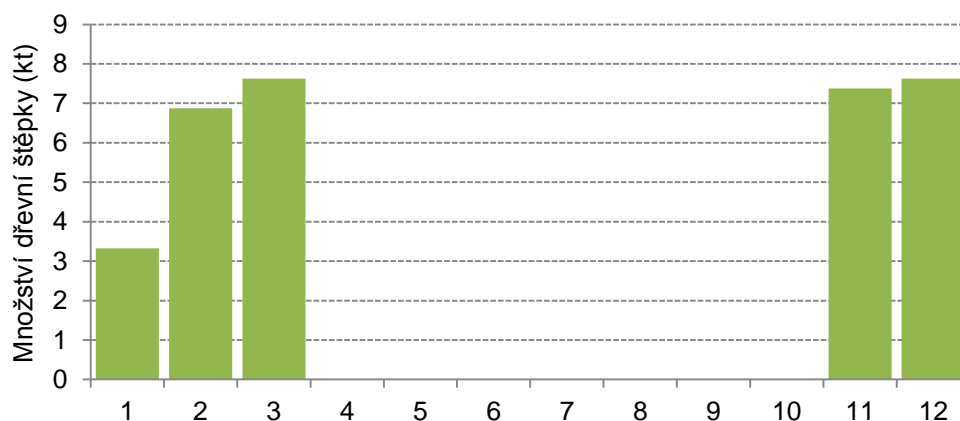
### 5.4.3 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

Z předchozích výsledků vyplývá, že využití biomasy závisí zejména na výši zelených bonusů a na poměru cen mezi uhlím a biomasovými palivy. Proto bude provedena analýza citlivosti na tyto ekonomické parametry.

Nejprve je pozornost zaměřena na vliv ceny biomasových paliv. Cena biomasových paliv je dána poměrnou cenou vůči ceně uhlí. Ze současných hodnot (viz tab. 19) je cena biomasových paliv zvyšována vždy o 20 % v každém kroku. To znamená, že pokud je cena dřevní štěpky v prvním kroku zvýšena o 20 %, zvyšuje se její relativní cena vůči uhlí na 3,24. Výsledky analýzy jsou na obr. 53. Množství dřevní štěpky, *jds*, klesá postupně až do navýšení ceny o 80 %. To je zřejmě umožněno způsobem výpočtu množství zelené elektřiny, které je vyšší v zimních měsících. Toto tvrzení je podloženo rozložením dávkování dřevní štěpky během roku (konkrétně pro navýšení ceny o 40 %) na obr. 54. Z něho vyplývá, že využití dřevní štěpky je výhodné pouze v zimních měsících.

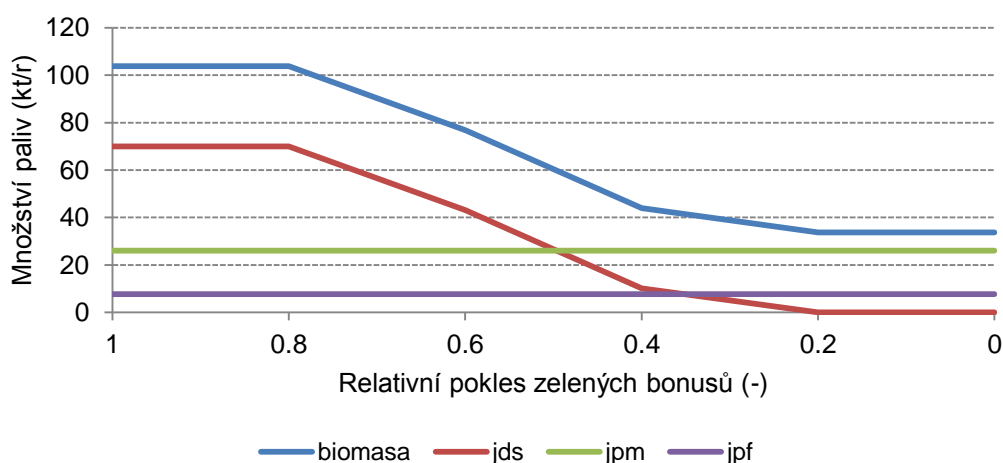


Obr. 53 Citlivost využití biomasových paliv na nárůstu jejich ceny



Obr. 54 Rozložení dávkování dřevní štěpky při zvýšené ceně

Analýza vlivu výše zelených bonusů byla provedena obdobným způsobem jako analýza vlivu cen s tím rozdílem, že zelené bonusy se v každém kroku snižují o 20 %. Vliv výše zelených bonusů zobrazuje graf na obr. 55. Biomasová paliva jsou využita na limitu dostupnosti až do 20% poklesu zelených bonusů. Další pokles pak má vliv pouze na využití dřevní štěpky. Paliva *jpm* a *jpf* jsou výhodná i při nulové výši zelených bonusů, což může být překvapující, protože jsou cca o 50 % dražší než uhlí. Důvodem výhodnosti je příjem z prodeje emisních povolenek, který převažuje nad zvýšeným nákladem na nákup paliv.

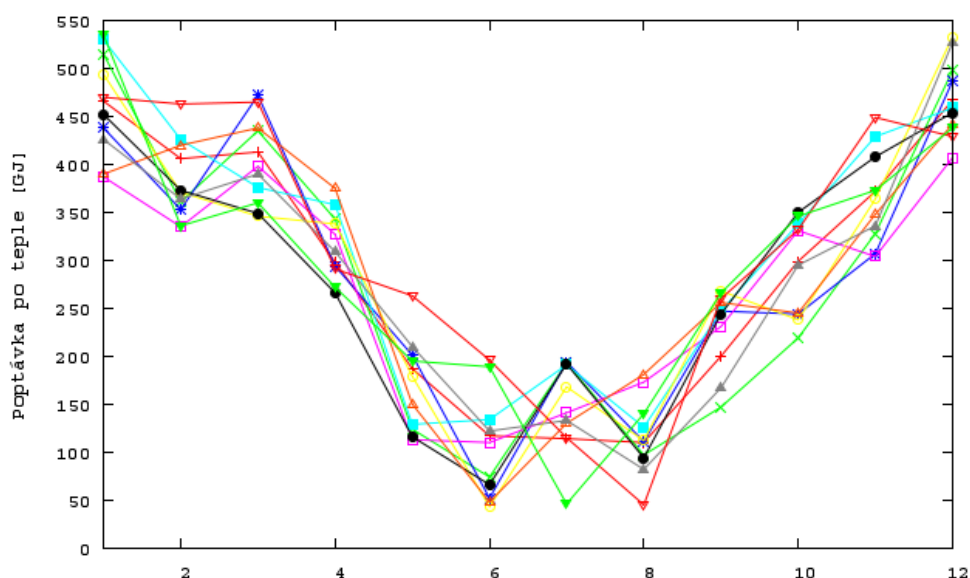


Obr. 55 Citlivost využití biomasových paliv na pokles zelených bonusů

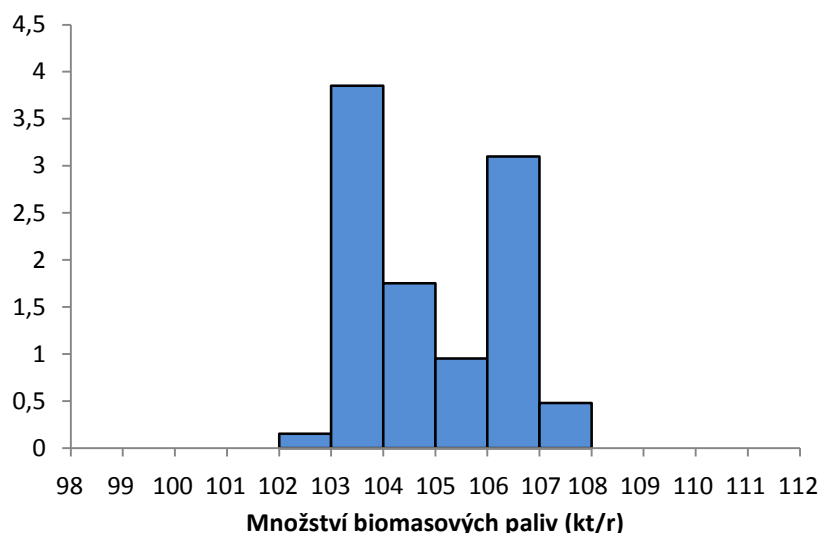
#### 5.4.4 STOCHASTICKÝ MODEL

Tato část se týká využití optimalizačního modelu pro stochastické výpočty. Tato problematika byla částečně řešena i v případě simulačního modelu spalovny (viz kapitola 6.5), kdy jako náhodný parametr vystupovala výhřevnost odpadu. Z předchozích analýz vyplývá, že množství vyrobeného tepla, resp. poptávka po teple, má vliv na výpočet množství zelené elektřiny a tím pádem by mohla ovlivnit také množství biomasových paliv. Poptávka po teple ovšem není dopředu známa. Na základě historických dat lze ale generovat různé scénáře poptávky (různé křivky roční poptávky), pro každý scénář pak provést optimalizaci a výsledky statisticky zpracovat. Vzhledem k tomu, že v případě teplárny nebylo k dispozici zdaleka tolik dat jako v případě spalovny, nebudou se hodnoty

generovat z rozdělení odhadnutého na základě dat, ale zvolíme standardní postup pro případ, kdy není rozdělení známo. Tím je generování hodnot z rovnoměrného rozdělení (každá hodnota má stejnou pravděpodobnost výskytu). Každá měsíční hodnota poptávky bude generována tak, že nejprve spočítáme průměrnou měsíční poptávku z historických dat. Po té určíme interval pro rovnoměrné rozdělení, ze kterého budou generovány náhodné odchylky od průměrné hodnoty. Tento interval je stanoven na  $(-40 \text{ GJ}, 40 \text{ GJ})$ , což vychází z maximální odchylky vyskytující se v historických datech. Ke každé průměrné měsíční poptávce pak přičítáme vygenerovanou odchylku a dostáváme scénáře. Ilustrativní průběhy poptávek pro různé scénáře jsou zobrazeny na obr. 56 (jednotlivé scénáře jsou barevně odlišeny). Z pohledu typu stochastické optimalizační úlohy jde o W-S přístup, protože vždy reagujeme na známou poptávku, tudíž známe realizaci náhodného parametru dříve než reagujeme. Pro každý scénář tak dostáváme optimální plán. Výsledky lze statisticky zpracovat podobně jako v případě spalovny. Jak bylo zmíněno, poptávka po teple ovlivňuje využívání biomasových paliv. Z histogramu pro množství biomasových paliv (obr. 57) je vidět, že s nejvyšší pravděpodobností bude využito mezi 103 až 104 kt biomasových paliv. Nejméně pravděpodobný je pokles využití pod 103 kt. Dále pravděpodobnost, že by využití kleslo pod 102 kt nebo stouplo nad 108 kt je téměř nulová. Pohybujeme se tedy ve velmi úzkém intervalu a pro management teplárny to znamená, že ať bude poptávka po teple jakákoliv (avšak v reálných mezích), lze počítat s tím, že biomasová paliva se vyplatí vždy. Tento postup lze analogicky použít i pro další parametry obsahující neurčitost, čímž by vznikl podstatně komplikovanější model.



Obr. 56 Ilustrace scénářů průběhů poptávky generovaných z rovnoměrného rozložení



Obr. 57 Histogram využití biomasových paliv

## 5.5 Obecný model teplárenského provozu využívajícího více paliv

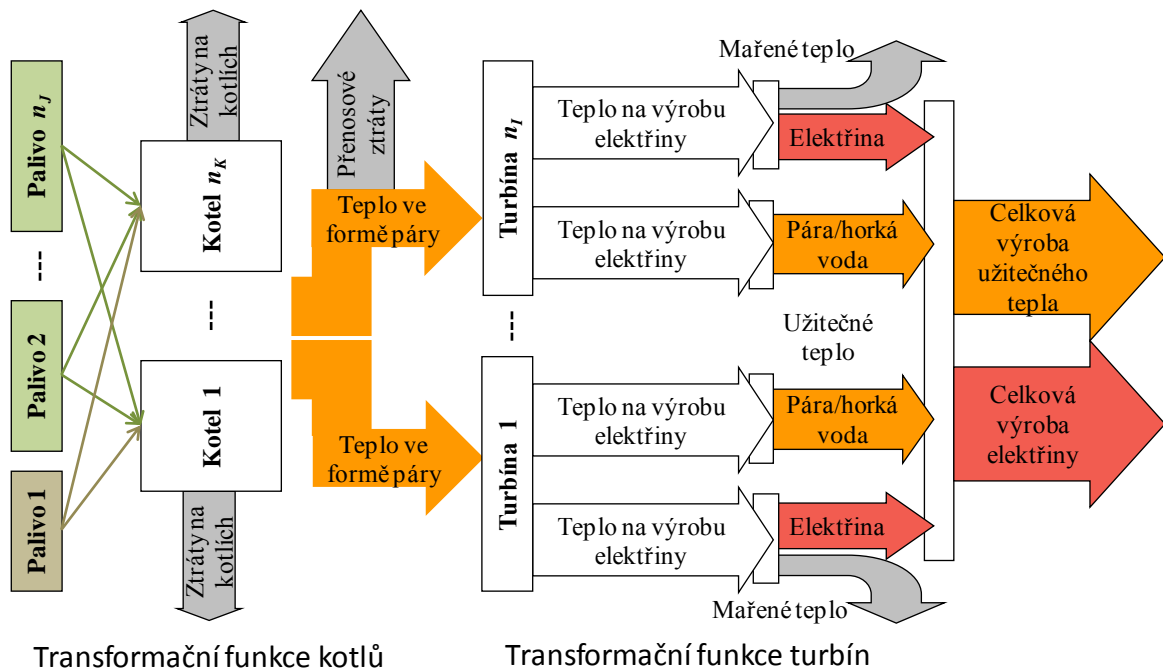
Obecný model teplárenského provozu, využívajícího více paliv, vznikl na základě předchozí případové studie. Z takového obecného modelu lze vycházet při modelování konkrétních provozů tak, aby vyhovoval řešenému problému (střednědobé a dlouhodobé plánování). Ve spolupráci s Ústavem matematiky byl navržen model, odpovídající tomuto účelu [81]. Model má tedy tři hlavní části: kotle, turbíny a využití generované energie. Zobecněné vazby mezi těmito částmi zobrazuje obr. 58. Model je navržen tak, aby umožňoval řešit problémy týkající se existujících teplárenských provozů, kde jsou k dispozici provozní data a lze aplikovat regresní analýzu pro popis systému. Pokud nejsou data k dispozici, je možné použít některý simulační software, např. software W2E, kde lze systém nasimulovat v několika provozních stavech a ty pak použít stejně jako provozní data. V tomto případě může být vhodné aplikovat techniky plánování experimentu, které lze nalézt např. [82].

Dále máme pět základních množin

- Množina období  $T$  obsahuje časové kroky, např. měsíce.
- Množina paliv  $J$  obsahuje všechny typy paliv, které se v provozu využívají jako uhlí, dřevní štěpka a další biomasová paliva.
- množiny kotlů  $K$ . V teplárnách je obvykle více kotlen, ve kterých jsou instalované kotle různého stáří či typu. Podle okolností lze kotelnu modelovat jako jeden kotel.
- Množina turbín  $P$  může zahrnovat nejen turbíny, ale také redukční stanice.
- Množina energií  $M$  obsahuje právě dva prvky: elektřinu a teplo.

Podle specifických potřeb lze z těchto pěti množin vytvořit podmnožiny, které budou definovat užší oblast použití prvků základních množin.

Následuje výčet základních transformačních funkcí modelu.



pozn.:  $n_J, n_K, n_I$ ...počet prvků množiny  $J, K, I$

Obr. 58 Zobecněné schéma teplárenského provozu

### Parní a horkovodní kotle

U kotlů jsou to transformační funkce pro výpočet energie vnesené palivy:

$$u_{j,k,t} = f(x_{j,k,t}, \xi_j) \quad (7.23)$$

a pro výpočet tepla předaného páře v kotlích:

$$v_{j,k,t} = f(u_{j,k,t}, \eta_k) \quad (7.24)$$

Určení účinnosti kotlů může být problematické. V práci [70] zastávají názor, že, podle výsledků testů v provozech spoluspalujících uhlí a biomasová paliva, využití biomasy snižuje účinnost kotle. Pronobis [83] ve své práci srovnal vliv tří druhů biomasy na účinnost kotle a zjistil mezi nimi významné rozdíly. Dá se tedy říci, že biomasa způsobuje snížení účinnosti kotle, avšak záleží na druhu biomasy, což už je ale předmět detailních analýz.

Z omezujících podmínek jsou podstatné podmínky na kapacitu kotlů:

$$\sum_{j \in J} u_{j,k,t} \leq b_{k,t} \quad (7.25)$$

Index  $t$  může působit jako zbytečný, ale v některých případech může být opodstatněné mít různé kapacity pro různá období (např. snížení kapacity kvůli pravidelné odstávce).

Dále je potřeba uvést omezení na dostupnost paliv (toto omezení propojuje jednotlivé časové kroky):

$$\sum_{k \in K} x_{j,k,t} \leq a_{j,t} \quad (7.26)$$

Množství dávkované biomasy je při přímém spalování obvykle omezeno. Omezení se pak udává jako maximální procento z množství uhlí nebo maximální procento z energie vnesené uhlím.

### Parní turbíny

U turbín je nejprve třeba vyjádřit transport energií (ve formě páry) z kotelny na turbíny.

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} v_{j,k,t} = \sum_{p \in P} w_{p,t} \quad (7.27)$$

Velké teplárenské provozy jsou vybaveny flexibilním kogeneračním systémem, který zahrnuje více stupňů (např. jedna protitlaková turbína a jedna kondenzační turbína). Jak bylo zmíněno, tento model je navrhován pro plánování provozu v dlouhodobém časovém horizontu, plánování provozu jednotlivých turbín není předmětem, a proto je strojovna modelována jako jeden systém. Strojoven ale může být více. Vztah mezi energií vedenou do strojovny a kombinovanou výrobou elektřiny a tepla lze vyjádřit pomocí následující funkce:

$$w_{p,t} = f(y_{p,m,t}) \quad (7.28)$$

Energetické ztráty, způsobené při výrobě elektřiny (mechanické ztráty v převodovce, účinnost generátoru), jsou vyjádřeny společně s mařeným teplem v chladicích věžích následující rovnicí:

$$w_{p,t} = \sum_{m \in M} y_{p,m,t} + y_{p,t}^- \quad (7.29)$$

Stejně jako v případě kotlů i v případě strojovny existuje kapacitní omezení dané nerovnicí:

$$w_{p,t} \leq c_{p,t} \quad (7.30)$$

### Využití energií

Nakonec je potřeba model doplnit o funkce popisující export a vlastní spotřebu elektřiny a tepla. Vlastní spotřeba elektřiny vychází z provozního stavu teplárny, tedy z výroby tepla na všech kotlích.

$$y_{me,t}^{sc} = f\left(\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} v_{j,k,t}\right) \quad (7.31)$$

V případě vlastní spotřeby tepla se lze orientovat podle poptávky po teple, protože ta reflektuje topné období.

$$y_{mh,t}^{sc} = f(y_{mh,t}^{ex}) \quad (7.32)$$

Mezi výrobou, vlastní spotřebou a exportem tepla, resp. elektřiny, musí platit energetická bilance.

$$y_{m,t} = y_{m,t}^{sc} + y_{m,t}^{exp} \quad (7.33)$$

V práci [84] je tento obecný model využit pro výpočty týkající se integrace jednotky pro energetické využití odpadů do teplárenského provozu.

## 6. APLIKACE NAVRŽENÉHO POSTUPU V JINÝCH OBLASTECH

Tato kapitola má za cíl ukázat univerzálnost přístupu, který byl použit při řešení úloh z oblasti energetického využití odpadů a biomasy. Zde je aplikován na model energetického zdroje komplexu budov.

### 6.1 Popis energetického systému komplexu budov

Cílem bylo vytvořit technicko-ekonomický model zdrojové části energetického systému komplexu budov. Výsledkem je matematický popis systému, který na základě požadavků na zdrojovou část energetického systému a jejich pokrytí vybranými jednotkami dopočítá spotřeby topného oleje, zemního plynu a elektrické energie.

Tento simulační nástroj je rozšířen o jednoduchý klimatický model, na jehož základě jsou tyto požadavky odhadovány. Na obr. 59 je schéma energetického zdroje. Vytápění areálu zajišťují především kondenzační kotle (K3 a K4), jejichž jedna větev zpětné vody je chlazena ve výměníku “dochlazování zpátečky”. Kotle na plyn a topný olej K1 a K2 slouží pro pokrytí špičkových stavů. Dále je instalováno tepelné čerpadlo (TČ) využívající odpadní teplo, které vzniká v rámci technologického zařízení budov. Zdrojem tepla pro reverzní chladicí jednotku (RJ) je voda z blízké řeky přes “výměník řeka”, odpadní teplo z chlazení zpětné vody ke kotlům K3 a K4 (výměník “dochlazování zpátečky”) a odpadní teplo z chlazení osluněných fasád komplexu budov. RJ tedy funguje zároveň jako zdroj chladu. Dalšími chladicími jednotkami jsou jednotky Trane (CJ) 2 a 3. Model zdrojové části je tedy rozdělen na:

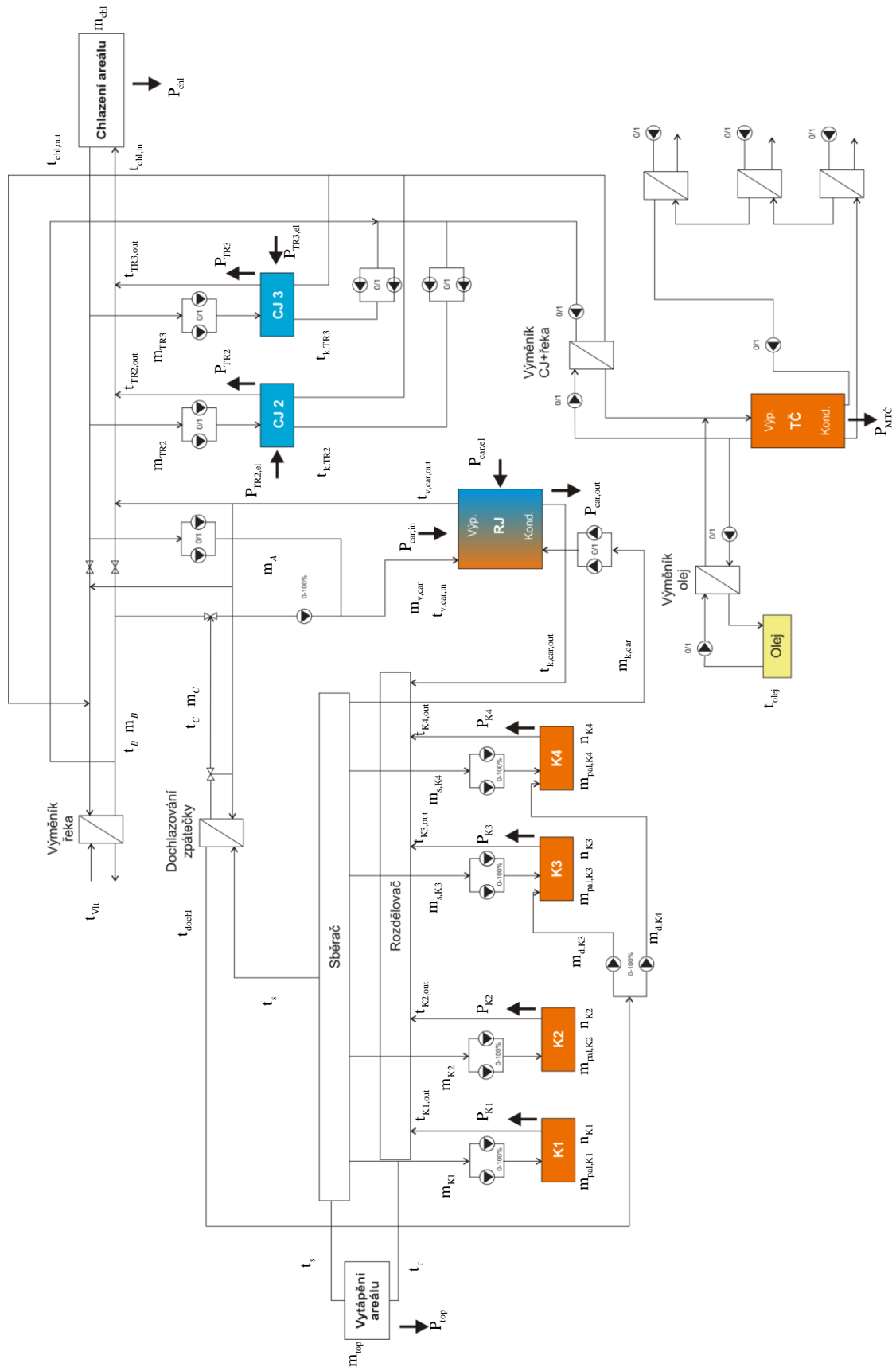
- model systému vytápění
  - 2 x kondenzační plynový kotel (K3 a K4)
  - 2 x kotel na plyn a topný olej (K1 a K2)
  - 1 x reverzní chladicí jednotka (RJ)
  - 1 x tepelné čerpadlo (TČ)
- model systému chlazení – chladicí stroje CJ 2 a 3, RJ
  - 2 x chladicí stroj (CJ 2 a 3)
  - 1 x reverzní chladicí jednotka (RJ)

Oba subsystémy jsou ale vzájemně propojeny jednotkou RJ.

Model je koncipován tak, aby na základě požadovaného topného a chladicího výkonu a jejich pokrytí vybranými jednotkami dopočítal spotřeby topného oleje, zemního plynu a elektrické energie.

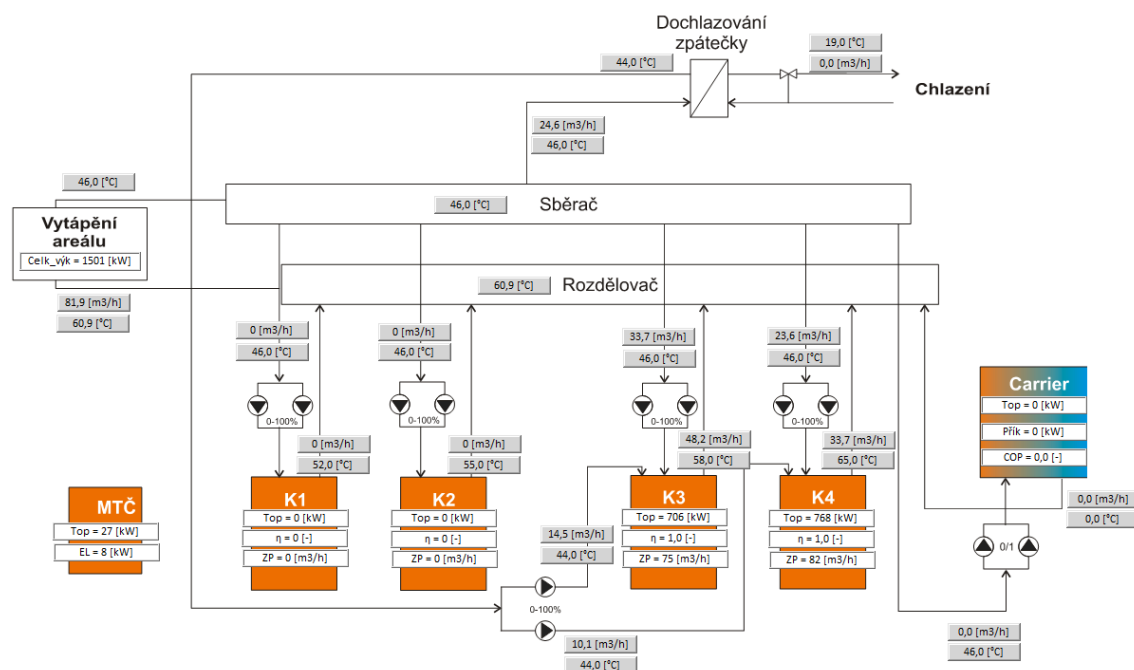
Pro odhad požadovaného topného výkonu byl vytvořen jednoduchý klimatický model vycházející z archivovaných dat. Požadovaný chladicí výkon není modelován.

Model je upraven do podoby simulačního nástroje implementovaného v prostředí MS Excel (obr. 60).



Obr. 59 Schéma energetického systému komplexu budov





Obr. 60 Implementace modelu do MS Excel a uživatelské rozhraní modelu (vytápění)

## 6.2 Klimatický model

Spotřeba tepla v areálu je přirozeně ovlivňována celou řadou faktorů (venkovní teplota, oslunění jednotlivých fasád, teplota požadovaná teplota v jednotlivých částech budovy, obsazenost budov apod.). Vliv jednotlivých faktorů je obtížně popsatelný, proto byl topný výkon odhadován pouze na základě venkovní teploty vzduchu a denní doby (hodiny). Z grafu na obr. 61 je zřejmé, že výroba tepla závisí na venkovní teplotě exponenciálně. Jak je dále vidět, teploty ve sledovaném období neklesly pod  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , odhady pro nižší teploty tedy nemusí být správné. Pás bodů na obr. 61 je poměrně široký. Vzhledem k tomu, že obsazenost budov a potřeba vytápění jsou přes den proměnné (bez závislosti na teplotě), lze rozložením bodů do jednotlivých hodin získat přesnější odhad závislosti, zejména v oblasti nižších teplot (viz obr. 62).

Výsledná funkce je tedy exponenciální ve tvaru:

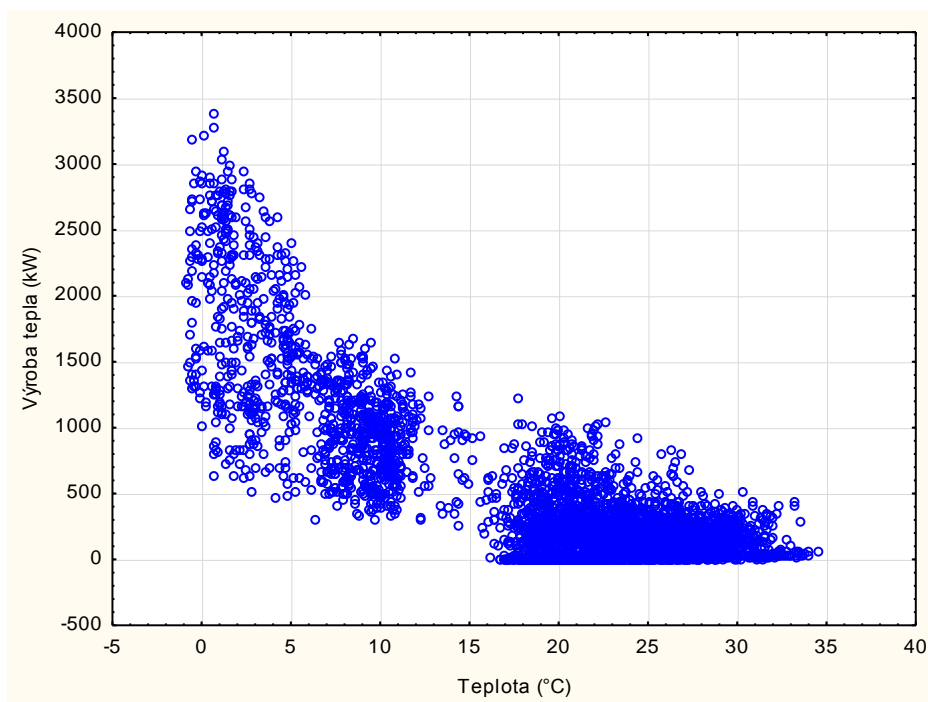
$$P_{top} = a \cdot \exp(b \cdot t_{vzduch}) \quad (\text{kW}) \quad (1)$$

kde konstanty  $a$  a  $b$  jsou odhadnuty pro každou denní dobu (hodinu) zvlášť a jsou uvedeny v tab. 20.

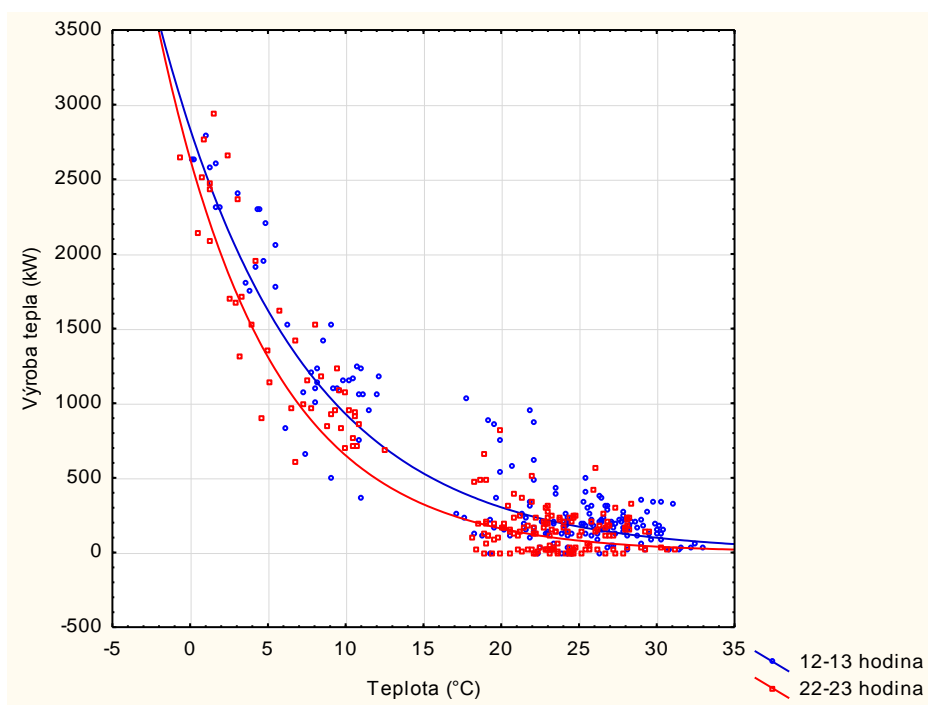
Tab. 20 konstanty pro regresní funkci odhadu požadovaného topného výkonu

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$a$	1900,8	1437,9	1527,1	1357,4	1428,8	1629,2	1885,2	1936,6	2228,0	2568,1	2635	2724,1
$b$	-0,139	-0,140	-0,155	-0,170	-0,190	-0,196	-0,167	-0,114	-0,108	-0,110	-0,108	-0,109
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
$a$	2887,2	2839,2	2765,1	2757,2	2364,2	2387,6	2385,9	2143,9	2681,0	2590,1	3049,1	2638,4
$b$	-0,113	-0,112	-0,109	-0,111	-0,102	-0,103	-0,107	-0,106	-0,124	-0,125	-0,140	-0,140

Celkový model energetického systému se skládá z modelů jednotek, které jsou doplněny o vzájemné vazby. Při modelování je kombinován přístup pomocí hmotnostních a energetických bilancí a regresní analýzy.



Obr. 61 Závislost výroby tepla na venkovní teplotě



Obr. 62 Závislost výroby tepla na venkovní teplotě – srovnání v časových pásmech

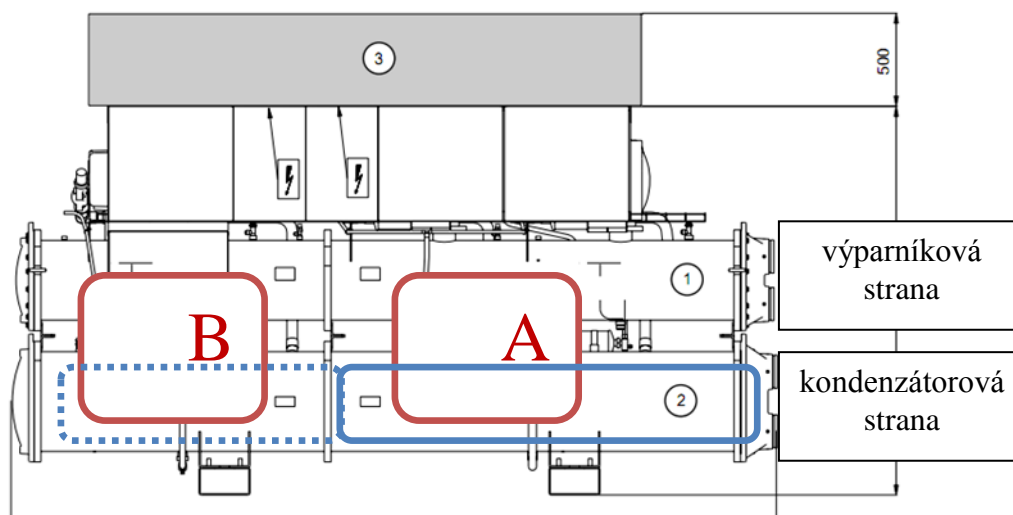
Vzhledem k tomu, že jde o rozsáhlý systém, bude pro ukázkou uvedeno modelování pouze jednoho aparátu – reverzního chladicího stroje. Ten představuje nejkomplikovanější blok.

### 6.3 Model reverzní chladicí jednotky

Jednotka RJ funguje jako zdroj tepla i chladu. Vyrobené teplo dodává stejně jako kotle do rozdělovače. Teplo může čerpat ze třech různých zdrojů a tyto zdroje může kombinovat:

- Režim A – chlazení osluněných fasád provozní budovy
- Režim B – voda z řeky
- Režim C – dochlazování zpětné vody kotlů.

V režimu A tedy funguje jako zdroj chladu. RJ obsahuje dva samostatné okruhy (A a B) s chladivem, přes které se realizuje předání tepla mezi výparníkovou (chlazení) a kondenzátorovou (ohřev) stranou. Tepelná čerpadla jsou nad rámec zaměření dizertační práce a proto zde nebude související teorie detailněji probírána. Schéma RJ s chladicími okruhy A a B je na obr. 63.



Obr. 63 Schéma okruhů s chladivem v jednotce reverzní chladicí jednotky

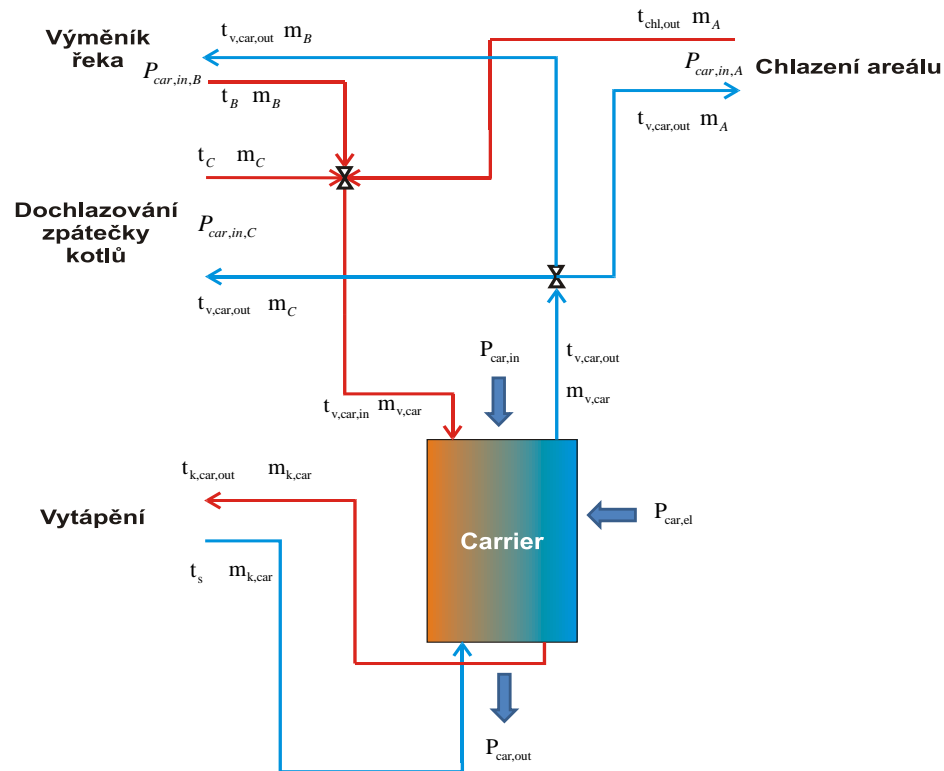
Cílem analýzy provozních dat jednotky RJ bylo vyhodnotit topný (COP) a chladicí faktor (CF) zařízení v určitém provozním režimu.

Technologické schéma samotné jednotky RJ je na obr. 64. Značení použité v obrázku souhlasí se značením použitým v rovnicích (8.1) až (8.11).

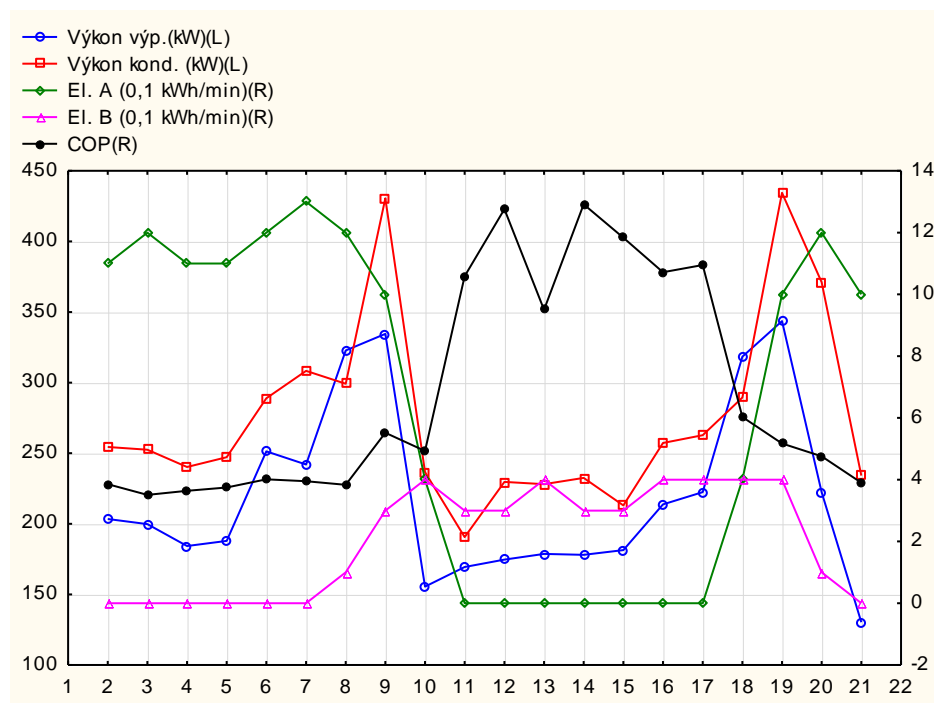
V případě jednotky RJ bylo důležité zjistit závislost COP, resp. CF, faktoru na vstupní teplotě vody na výparníkové straně a výstupní teplotě vody na kondenzátorové straně.

V archivovaných datech se však objevovaly nereálně vysoké hodnoty COP, resp. CF. Proto bylo provedeno na jednotce vlastní měření s cílem získat lepší vhled do problému. Na obr. 65. je vidět průběh COP, výkonů a příkonů po dobu cca 20 minut (data odečítána po minutě). Každý z chladicích okruhů A a B má vlastní elektroměr. Tím lze identifikovat, který z okruhů je právě v chodu. Pokud je v chodu chladicí okruh B (v obr. 65 identifikováno nenulovou hodnotou na spojnici El. B – odběr elektřiny okruhem B), značně narůstá COP (až na hodnotu 12). Pokud je v chodu chladicí okruh A (v obr. 65 identifikováno nenulovou hodnotou na spojnici El. A – odběr elektřiny okruhem A), COP se pohybuje na obvyklých hodnotách (3 až 4). Toto chování je patrné i v archivovaných datech, kde záznamy s převážným podílem odběru okruhem A mají obvyklé

hodnoty COP, zatímco záznamy s převážným podílem odběru okruhem B mají COP mnohem vyšší.



Obr. 64 Schéma reverzní chladicí jednotky



Obr. 65 COP, výkon a příkon jednotky reverzní chladicí jednotky

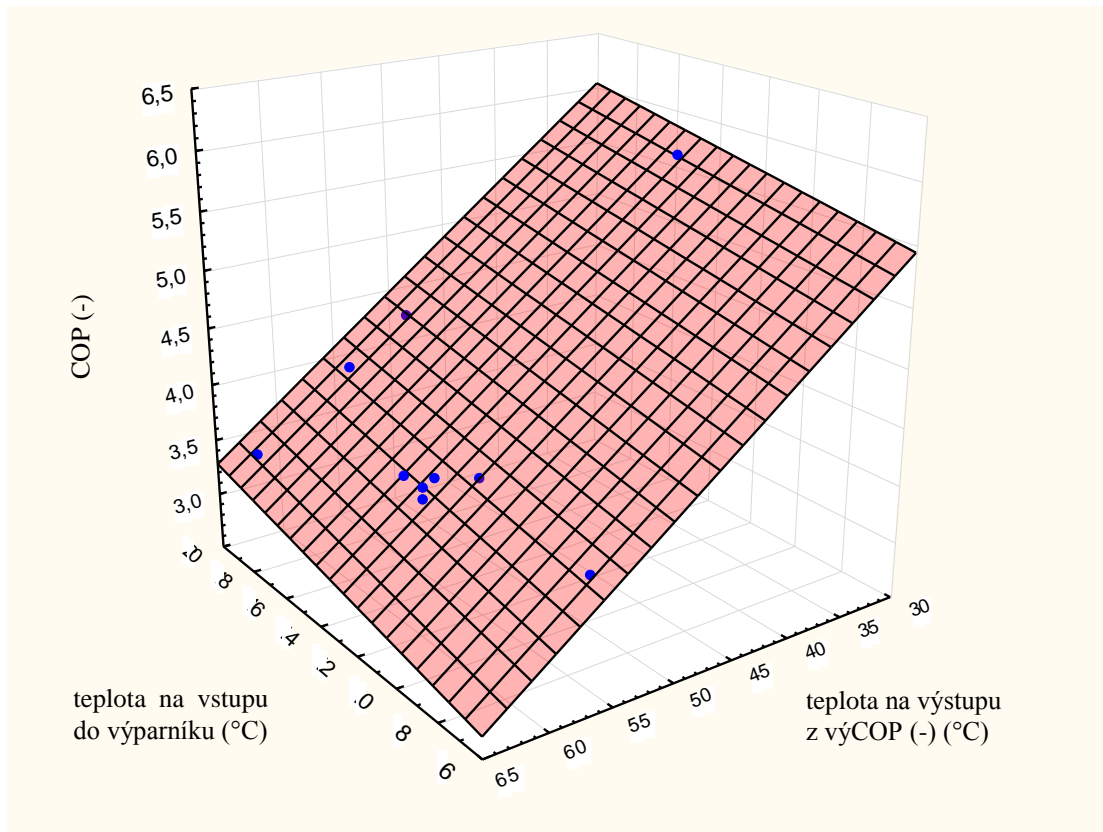
Toto chování může být dynamického charakteru. Z naměřených dat vyplývá, že se oba okruhy střídají, pokud to jde – tzn. jeden sepnutý okruh stačí na požadovaný výkon.

Okruh A je umístěn před okruhem B (vztaheno k vstupu a výstupu vody na kondenzátorové straně). To může vysvětlovat vysoké COP. Pokud je okruh B vypnutý, voda se k němu nedostane a předání tepla probíhá jen v okruhu A. Pokud je sepnut okruh B a okruh A ne, voda se k okruhu B dostává přes okruh A a přitom čerpá zbytkové teplo z okruhu A (ze zahřátých trubek, z chladiva v okruhu A, atd.). Další vysvětlení může spočívat v chybných datech z elektroměru.

Vzhledem k tomuto problému nebylo možné sestavit model na základě archivovaných dat, ale byla využita data dodaná ze strany dodavatele jednotky RJ. Tato data, uvedená v tabulce tab. 21, byla analyzována s cílem najít funkci popisující COP na základě teplotních parametrů ohřívání a chlazení vody a tuto funkci pak použít ve vztahu pro výpočet elektrického příkonu z topného výkonu a COP:  $P_{car,el} = P_{car,in} / COP$ . Graf této regresní funkce je na obr. 66. Po dosazení do vztahu uvedeného pro výpočet elektrického příkonu pak dostáváme rovnici (8.8). Obdobným způsobem se postupovalo v případě výpočtu elektrického příkonu z chladicího výkonu a CF (rovnice (8.9)), čímž se docílilo propojení všech tří podstatných veličin – topný výkon, chladicí výkon, elektrický příkon.

Tab. 21 provozní data reverzní chladicí jednotky

Výparník		Kondenzátor		Chladicí výkon	Příkon	CF	COP
vstup	výstup	vstup	výstup				
(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(kW)	(kW)	(-)	(-)
12	6	45	55	1127	410	2,75	3,70
13	9	53	58	1183	455	2,60	3,60
13	8	53	58	1151	451	2,60	3,50
14	9	53	58	1184	455	2,60	3,60
13	9	52	57	1191	447	2,67	3,65
15	8	22	32	1320	280	4,72	5,70
7	4	45	55	1025	407	5,52	3,47
19	13	53	63	1256	509	2,47	3,42
19	13	40	50	1376	405	3,40	4,35
19	13	45	55	1332	442	3,01	4,00



Obr. 66 Regresní funkce pro výpočet topného faktoru reverzní chladicí jednotky

Výpočtové vztahy použité v modelu pro jednotku RJ jsou následující (pozn.: měrná tepelná kapacita  $c = 1,163 \text{ kW}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ):

- bilance ohřevu vody na kondenzátorové straně

$$P_{car,out} = (t_{k,car,out} - t_s) \cdot m_{k,car} \cdot c \quad (8.1)$$

- bilance chlazení vody na výparníkové straně

$$P_{car,in} = (t_{v,car,in} - t_{v,car,out}) \cdot m_{v,car} \cdot c \quad (8.2)$$

- bilance chladicího výkonu z jednotlivých režimů

$$P_{car,in} = P_{car,in,A} + P_{car,in,B} + P_{car,in,C} \quad (8.3)$$

- bilance chladicího výkonu v režimu A

$$P_{car,in,A} = (t_{chl,out} - t_{v,car,out}) \cdot m_A \cdot c \quad (8.4)$$

- bilance chladicího výkonu v režimu B

$$P_{car,in,B} = (t_B - t_{v,car,out}) \cdot m_B \cdot c \quad (8.5)$$

- bilance chladicího výkonu v režimu C

$$P_{car,in,C} = (t_C - t_{v,car,out}) \cdot m_C \cdot c \quad (8.6)$$

- teplo odebrané dochlazované zpětné vodě kotlů

$$P_{car,in,C} = (t_s - t_d) \cdot (m_{d,K3} + m_{d,K4}) \cdot c \quad (8.7)$$

- regresní funkce pro výpočet elektrického příkonu z chladicího výkonu

$$P_{car,el} = \frac{P_{car,in}}{(6,57 + 0,04 \cdot t_{v,car,in} - 0,078 \cdot t_{k,car,out})} \text{ (kW)} \quad (8.8)$$

- regresní funkce pro výpočet elektrického příkonu z topného výkonu

$$P_{car,el} = \frac{P_{car,out}}{(7,55 + 0,04 \cdot t_{v,car,in} - 0,078 \cdot t_{k,car,out})} \text{ (kW)} \quad (8.9)$$

Dále jsou použity vztahy pro směřování a rozdělování větví jednotlivých režimů na výparníkové straně:

- hmotnostní bilance smísení průtoků vody na výparníkové straně

$$m_A + m_B + m_C = m_{v,car} \quad (8.10)$$

- energetická bilance smísení průtoků vody na výparníkové straně

$$m_A \cdot t_{chl,out} + m_B \cdot t_B + m_C \cdot t_C = m_{v,car} \cdot t_{v,car,in} \quad (8.11)$$

Pro celý topný systém jsou pak použity vztahy pro rozdělovač topné vody:

- hmotnostní bilance rozdělovače

$$m_{K1} + m_{K2} + m_{s,K3} + m_{d,K3} + m_{s,K4} + m_{d,K4} + m_{k,car} = m_{top} \quad (8.12)$$

- energetická bilance rozdělovače

$$m_{K1} \cdot t_{K1} + m_{K2} \cdot t_{K2} + (m_{s,K3} + m_{d,K3}) \cdot t_{K3} + (m_{s,K4} + m_{d,K4}) \cdot t_{K4} + m_{k,car} \cdot t_{k,car,out} = m_{top} \cdot t_r \quad (8.13)$$

Výsledný model zařízení RJ umí vyhodnotit aktuální elektrický příkon v závislosti na aktuálním topném resp. chladicím výkonu a teplotních podmínkách na kondenzátorové a výparníkové straně. Jedná se o výrazně detailnější model, než by odpovídalo využití konstantních hodnot COP a CF, získaných např. z dlouhodobých bilancí systému.

## 6.4 Výpočet, soustava rovnic

Rovnice pro všechny jednotky vyjma RJ, lze řešit postupným výpočtem. Rovnice pro RJ nelze řešit postupným výpočtem a je nutné je řešit jako soustavu rovnic. Z implementačního hlediska se jedná o úlohu výrazně složitější než v případě modelu spalovny (kapitola 4.4). Jde o rovnice (8.1) až (8.12). Rovnici (8.13) lze vyjádřit jako lineární kombinaci zbylých rovnic a pro řešení je tedy nadbytečná. Pro řešení soustav nelineárních rovnic se nejčastěji používá Newtonova metoda, která je i poměrně

jednoduchá na naprogramování. Newtonova metoda však klade podmínky na vlastnosti soustavy rovnic. Konkrétně vyžaduje nenulový Jacobián. Právě tato podmínka není splněna. Řešení soustavy lze v takovém případě převést na optimalizační úlohu následujícím postupem:

- Úprava rovnic – převod všech členů každé rovnice na pravou stranu např.  
 $0 = x_1^2 + x_2, 0 = x_1 + x_2^2$
- Definice účelové funkce – účelová funkce je tvořena součtem druhých mocnin pravých stran rovnic  
$$f = (x_1^2 + x_2)^2 + (x_1 + x_2^2)^2$$
- Definice úlohy – minimalizace účelové funkce  
 $\min(f).$

Ideálně bude minimum nula, většinou jde však o čísla velmi blízká nule. Tím je zajištěno, že pravé strany jsou po dosazení nalezeného řešení téměř na hodnotě nula a splňují tedy rovnici (alespoň z pohledu numerického řešení).

U numerických, případně optimalizačních výpočtů, je pravidlem, že úspěšné vyřešení záleží na počátečním odhadu neznámých. Nastavení počátečních hodnot neznámých může záležet (a také často záleží) na hodnotách vstupních parametrů. Proto je vhodné zadávat přibližné odhady možných řešení, případně sestavit algoritmus, který umožní generování počátečních odhadů, dokud není nalezeno řešení.

MS Excel má v sobě zabudovaný nástroj „řešitel“ pro řešení optimalizačních úloh. Ten je použit pro řešení soustavy rovnic výše popsaným způsobem.

V další fázi lze model použít pro úlohu minimalizace provozních nákladů. Nastavení a výkon jednotek by nebyl zadáván, ale byl by automaticky nastavován na základě výsledků této úlohy.



## 7. ZÁVĚR

Energetické využití odpadů představuje v současnosti jeden z hlavních směrů v odpadovém hospodářství. Zejména ve vyspělých státech EU, kde téměř neexistuje skládkování, je toto nakládání s odpady velmi rozšířené. V České republice se zatím většina odpadů skládá, ale v důsledku přijatých směrnic EU se dá předpokládat, že dojde k odklonu od skládkování a ke zvýšení kapacity (výstavbou nových zařízení) pro energetické využití odpadů.

Podobná situace je v oblasti využití obnovitelných zdrojů energie, kde se ČR vůči EU zavázala významně navýšit podíl vyrobené energie z těchto zdrojů. Dá se předpokládat, že stěžejní zdroj pro naplnění tohoto závazku bude biomasa. Ta se dnes hojně využívá ve velkých energetických zdrojích při takzvaném spluspalování uhlí a biomasy a do budoucna se dá očekávat, že tento trend bude pokračovat.

Jako podpůrný prostředek pro zefektivnění provozů nebo jako podpora při rozhodování např. o investicích, mohou sloužit simulační a optimalizační nástroje. Pomocí nich lze odhadovat chování systému za různých provozních podmínek a případně najít optimální nastavení.

V dizertační práci je navržen systematický přístup pro vytváření modelů pro účely simulace a optimalizace. Tento přístup je demonstrován na několika případových studiích založených na řešení konkrétních inženýrských problémů z praxe. V oblasti simulace byl detailně popsán postup vytvoření technicko-ekonomického modelu existujícího zařízení pro energetické využití odpadů. Přínosem je aplikace stochastických metod použitých k modelování a simulaci těchto zařízení. Tento přístup reflektuje charakter výhřevnosti odpadu coby náhodné veličiny. Analogickým způsobem byl zpracován simulační model energetického systému zajišťujícího dodávku tepla a chladu pro komplex budov. Přestože obě případové studie jsou na první pohled svým charakterem podobné, liší se svou komplexností a použitým simulačním přístupem.

Využití optimalizačních metod je prezentováno v úloze z oblasti dlouhodobého plánování investic, která opět vychází z konkrétního zadání a požadavků průmyslové sféry. Jedná se o optimální využití palivové základny teplárenského provozu spalujícího uhlí a různá paliva na bázi biomasy. Vzhledem ke specifickým podmínkám, které se váží na biomasová paliva (zelené bonusy, omezená dostupnost), je tato úloha přínosem pro řadu praktických aplikací. Vzhledem k postupnému omezování disponibility a zvyšování ceny biomasy se dá předpokládat široké uplatnění vytvořeného systému.

Vedle biomasy je velmi perspektivní aplikace optimalizačních metod také na úlohy z oblasti energetického využití odpadů. V tomto směru budou probíhat další výzumné práce, které mají napomoci k efektivnímu energetickému využití odpadů s důrazem na využití vyrobeného tepla v rámci teplárenských soustav. Konkrétně se jedná např. o následující úlohy:

- optimální plánování investic do zařízení pro spalování odpadů – určení kapacity a způsobu využití tepla
- integrace zařízení na energetické využití odpadů do existujících teplárenských provozů.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BP Global [online]. 2011 [cit. 22. dubna 2012]. Statistical Review of World Energy June 2011. dostupné z <<http://www.bp.com/sectionbodycopy.do?categoryId=7500&contentId=7068481>>
- [2] IEA Statistics [online]. 2012, [cit. 24. dubna 2012]. Dostupné z <[http://www.iea.org/stats/pdf\\_graphs/29PROD.pdf](http://www.iea.org/stats/pdf_graphs/29PROD.pdf)> .
- [3] Shaffie, S., Topal, E.: When will fossil fuel reserves be diminished?. *Energy Policy*, 2009, vol. 37, no. 1, pp. 181-189. ISSN 0301-4215.
- [4] Usnesení Senátu z 15. schůze, konané dne 11. ledna 2012, k návrhu zákona o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů /senátní tisk č. 252/
- [5] Perry, S., Klemeš, J., Bulatov, I.: Integrating waste and renewable energy to reduce the carbon footprint of locally integrated energy sectors. *Energy*, 2008, vol. 33, no. 10, pp. 1489-1497. ISSN 0360-5442
- [6] Lam, H.L., Varbanov, P., Klemeš, J.: Minimising carbon footprint of regional biomass supply chains. *Resour Conserv Recycling*, 2010, vol. 54, no. 5, pp. 303-309. ISSN 0921-3449
- [7] Council Directive 2009/28/EC of the European parliament and of the council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources, Official Journal of the European Communities, 5. June 2009, L140: 16-62
- [8] Jirásek, P.: Národní akční plán ČR pro obnovitelné zdroje energie, In 7. celostátní konference AEA, Asociace energetických auditorů, [online]. 2011, [cit. 15. března 2012]. Dostupné z <[http://www.aeaonline.cz/?page=konference\\_aea2011](http://www.aeaonline.cz/?page=konference_aea2011)>
- [9] Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, Ministerstvo životního prostředí ČR, Energetický regulační úřad. Zpráva o plnění indikativního cíle výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů za rok 2010, 2011.
- [10] Eurostat - Tables, Graphs and Maps Interface (TGM) table [online]. [cit. 25. dubna 2012]. Dostupné z <<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=tsien050&plugin=1>>
- [11] Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR. Obnovitelné zdroje energie v roce 2010 [online]. 2011, [cit. 16. března 2012]. Dostupné z <<http://www.tretiruka.cz/news/obnovitelne-zdroje-energie-v-roce-20101/>>
- [12] Council Directive 2006/12/EC of the European parliament and of the council of 5 April 2006 on waste, Official Journal of the European Communities, 27. April 2006, L114: 9-21
- [13] Ucekaj, V. *Analýza možností nakládání s komunálními odpady v rámci mikroregionu*. Brno, 2010. 153 s. Dizertační práce na FSI VUT v Brně. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.
- [14] Zákon ze dne 15. května o odpadech a o změně některých dalších zákonů. In *Sbírka předpisů České republiky*. 2001, částka 71/2001 sbírky, s. 4074-4259
- [15] KIC-jak to chodí ve spalovně odpadů [online]. [cit. 18. dubna 2012]. Dostupné z <<http://www.kic-odpady.cz/jak-to-chodi.html>>

- [16] Remr, J. Postoje obyvatel ČR k výstavbě ZEVO a spaloven, závěrečná zpráva studie projektu MPO-Efekt, 2011
- [17] Pavlas, M. *Systém pro výpočet technologických parametrů procesů včetně energetických aspektů*. Brno, 2008. 109 s. Dizertační práce. FSI VUT v Brně. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
- [18] Výroční zpráva TERMIZO, a.s. Liberec(CZ): TERMIZO, 2011
- [19] Pavlas, M., Touš, M., Benáčková, J., Hejl, M.: Určení výhřevnosti směsného komunálního odpadu statistickou analýzou výrobních ukazatelů ze zařízení EVO. In *58. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2011*. Praha: Česká společnost chemického inženýrství, 2011. s. 139-150. ISBN: 978-80-905035-0- 2.
- [20] Santoleri, Joseph J.; Reynolds, Joseph; Theodore, Louis. *Introduction to hazardous waste incineration*. New York : John Wiley & Sons, 2000. 658 s. ISBN 0-471-01790-6.
- [21] Pavlas, M., Mareš, M., Ucekaj, V., Oral, J., Stehlík, P.: Optimální nastavení výše podpory výroby elektřiny z odpadu ve vztahu k ceně elektřiny pro spotřebitele, závěrečná zpráva studie projektu MPO-Efekt, 2011
- [22] Council Directive 2008/98/EC of the European parliament and of the council of 19 November 2008 on Waste and repealing certain Directives, Official Journal of the European Communities, 22. November 2008, L312: 3-30
- [23] Grosso, M., Motta, A., Rigamonti, L.: Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive. *Waste Management*, 2010, vol. 30, no. 7, pp. 1238-1243. ISSN 0956-053X
- [24] Hrabčák, M. Překročíme odpadový Rubikon? O determinizme v odpadovom hospodárstve, Kuznetsových krivkách, ekonomickom raste, atď., In *Odpadové fórum 2011*. Praha: České ekologické manažerské centrum, 2011. ISBN: 978-80-85990-18- 8.
- [25] Kyselák, M.: Energetické využití odpadů z pohledu MPO, In *Spalovny (komunálního) odpadu 2012*, Praha, 2012
- [26] Pravda, L.: Biomasa jako obnovitelný zdroj energie, In *Energie z biomasy III - sborník příspěvků ze semináře*, Brno, 2004
- [27] Baxter, L.: Biomass-coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy. *Fuel*, 2005, vol. 84, no. 10, pp. 1295-1302. ISSN 0016-2361
- [28] Karafiát, J. Biomasa v energetice - podpora udržitelného rozvoje, nebo další průšvih? In *Teplárenské dny 2011, sekce II.*, Ostrava, 2011
- [29] Al-Mansour, F., Zuwala, J.: An evaluation of biomass co-firing in Europe. *Biomass Bioenergy*, 2010, vol. 34, no. 5, pp. 620-629. ISSN 0961-9534
- [30] Kufman, P. Přístup českých tepláren k využití biomasy pro výrobu elektřiny a tepla [online]. 2010, [cit. 21. března 2012]. Dostupné z < [http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/S2\\_06.pdf](http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/S2_06.pdf) >
- [31] EUBIA - European Biomass Industry Association [online]. 2007 [cit. 8. dubna 2010]. Co-Combustion with Biomass. Dostupné z <<http://www.eubia.org/333.0.html>>

- [32] Loo, S., Koopejan, J.: *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. London : Earthscan, 2008. 465 p. ISBN: 978-1-84407-249-1
- [33] Hansson, J., Berndes, G., Johnsson, F., Kjärstad, J.: Co-firing biomass with coal for electricity generation—An assessment of the potential in EU27. *Energy Policy*, 2009, vol. 37, no. 4, pp. 1444-1455. ISSN 0301-4215
- [34] Pavlas, M., Mareš, M., Ucekaj, V., Oral, J., Stehlík, P.: Optimalizace výše podpory elektřiny vyrobené z biomasy pro snížení vlivu na cenu elektřiny pro spotřebitele, závěrečná zpráva studie projektu MPO-Efekt, 2011
- [35] Vondráš, J. Důsledky neuvolnění limitů hnědého uhlí na další vývoj teplárenství v ČR - kritický scénář. In *Teplárenské dny 2011, sekce II.* , Ostrava, 2011
- [36] Poživil, J., Vaněk, T., Bernauer, B.: *Procesní systémové inženýrství*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 1997. 220 s. ISBN 80-7080-311-8.
- [37] Pavlas, M.: *Výpočtový systém pro analýzu využití energie u technologických linek*. Brno 2004. 50 s. Diplomová práce na FSI VUT v Brně. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
- [38] Martinák, P. *Efektivní využití externích energetických zdrojů v procesním průmyslu*. Brno 2002. Dizertační práce na FSI VUT v Brně. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
- [39] Shang, Z., Kokossis, A.: A transshipment model for the optimisation of steam levels of total site utility system for multiperiod operation. *Comput Chem Eng*, 2004, vol. 28, no. 9, pp. 1673-1688. ISSN 0098-1354
- [40] Pattison, J. R., & Sharma, V. : Selection of boiler plant and overall system efficiency. 1980, Studies in energy efficiency in buildings. British Gas.
- [41] Varbanov, P.S.: *Optimisation and synthesis of process utility systems*. Manchester 2004. PhD Thesis, UMIST. Supervisor prof. Robin Smith.
- [42] Mavromatis, S.,P., Kokossis, A.,C.: Conceptual optimisation of utility networks for operational variations—I. targets and level optimisation. *Chemical Engineering Science*, 1998, vol. 53, no. 8, pp. 1585-1608. ISSN: 0009-2509
- [43] Shang, Z., Kokossis, A.: A systematic approach to the synthesis and design of flexible site utility systems. *Chemical Engineering Science*, 2005, vol. 60, no. 16, pp. 4431-4451. ISSN 0009-2509
- [44] Varbanov, P.,S., Doyle, S., Smith, R.: Modelling and Optimization of Utility Systems. *Chem Eng Res Design*, 2004, vol. 82, no. 5, pp. 561-578. ISSN 0263-8762
- [45] Varbanov, P., Perry, S., Klemeš, J., Smith, R.: Synthesis of industrial utility systems: cost-effective de-carbonisation. *Appl Therm Eng*, 2005, vol. 25, no. 7, pp. 985-1001. ISSN 1359-4311
- [46] Medina-Flores, J.,M., Picón-Núñez, M.: Modelling the power production of single and multiple extraction steam turbines. *Chemical Engineering Science*, 2010, vol. 65, no. 9, pp. 2811-2820. ISSN 0009-2509
- [47] Luo, X., Zhang, B., Chen, Y., Mo, S.: Modeling and optimization of a utility system containing multiple extractions steam turbines. *Energy*, 2011, vol. 36, no. 5, pp. 3501-3512. ISSN 0360-5442
- [48] Budíková, M.: *Statistika II*. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 2006. 156 s.

- [49] Felder, R.,M., Rousseau, R.,W.: *Elementary Principles of Chemical Processes*. 3rd edition. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. 675 p. ISBN 0-471-68757-X
- [50] Lam, H.,L, Klemeš, J.J., Friedler, F., Kravanja, Z., Varbanov, P.S.: Software tools overview: Process integration, modelling and optimisation for energy saving and pollution reduction. *Chemical Engineering Transactions*, 2010, vol. 21, pp. 487-492.
- [51] Touš, M., Bébar, L., Houdková, L., Pavlas, M., Stehlík, P.: Waste-to-Energy (W2E) software -a support tool for decision making process. *Chemical Engineering Transactions*, 2009, vol. 18, pp. 971-976.
- [52] Kropáč J, Pavlas M, Fusek M, Klimek P, Touš M. Waste-to-energy systems modelling using in-house developed software. *Chemical Engineering Transactions*, 2011, vol. 25, pp. 533-538.
- [53] Pavlas, M., Touš, M., Klimek, P., Bébar, L.: Waste incineration with production of clean and reliable energy. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2011, vol. 13, no. 4, pp. 595-605. ISSN 1618-954X
- [54] Pavlas, M., Touš, M., Bébar, L., Stehlík, P.: Waste to energy – An evaluation of the environmental impact. *Appl Therm Eng*, 2010, vol. 30, no. 16, pp. 2326-2332. ISSN 1359-4311
- [55] Aguilar, O., Perry, S.,J., Kim, J.-K., Smith, R.: Design and Optimization of Flexible Utility Systems Subject to Variable Conditions: Part 2: Methodology and Applications. *Chem Eng Res Design*, 2007, vol. 85, no. 8, pp. 1149-68. ISSN 0263-8762
- [56] Birge, J.,R., Louveaux, F.: *Introduction to stochastic programming*. 1st ed. New York: Springer, 1997. 447 p. ISBN 0-387-98217-5
- [57] Ruszcynski, A., Shapiro, A. (Eds.): *Handbooks in Operations Research and Management Science: Stochastic Programming*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 2003. 683 p. ISBN 978-0-444-50854-6
- [58] Oh S.-D., Lee, H.-J., Jung, J.-Y., Kwak, H.-Y.: Optimal planning and economic evaluation of cogeneration system. *Energy*, 2007, vol. 32, no. 5, pp. 760-771. ISSN 0360-5442
- [59] Casisi, M., Pinamonti, P., Reini, M.: Optimal lay-out and operation of combined heat & power (CHP) distributed generation systems. *Energy*, 2009, vol. 34, no. 12, pp. 2175-83. ISSN 0360-5442
- [60] Lozano, M.,A., Ramos, J.,C., Serra, L.,M.: Cost optimization of the design of CHCP (combined heat, cooling and power) systems under legal constraints. *Energy*, 2010, vol. 35, no. 2, pp. 794-805. ISSN 0360-5442
- [61] Aguilar, O., Perry, S.,J., Kim, J.-K., Smith, R.: Design and Optimization of Flexible Utility Systems Subject to Variable Conditions: Part 1: Modelling Framework. *Chem Eng Res Design*, 2007, vol. 85. no. 8, pp. 1136-1148. ISSN 0263-8762
- [62] Beihong, Z., Weiding, L.: An optimal sizing method for cogeneration plants. *Energy Build*, 2006, vol. 38, no. 3, pp. 189-195. ISSN 0378-7788
- [63] Savola, T., Tveit, T., Fogelholm, C.: A MINLP model including the pressure levels and multiperiods for CHP process optimisation. *Appl Therm Eng*, 2007, vol. 27, no. 11-12, pp. 1857-1867. ISSN 1359-4311

- [64] Su, C.-T., Chiang, C.-L.: An incorporated algorithm for combined heat and power economic dispatch. *Electr Power Syst Res*, 2004, vol. 69, no. 2-3, pp. 187-195. ISSN 0378-7796
- [65] Kallrath, J., Pardalos, P.M., Rebennack, S., Scheidt, M. (Eds.): *Optimization in the Energy Industry*. 1st ed. Springer, 2009. 533 p. ISBN 978-3-540-88964-9
- [66] Yang, N., Yu, C.,W., Wen, F., Chung, C.,Y.: An investigation of reactive power planning based on chance constrained programming. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2007, vol. 29, no. 9, pp. 650-656. ISSN 0142-0615
- [67] Nabona, N., Pagès, A.: A three-stage short-term electric power planning procedure for a generation company in a liberalized market. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2007, vol. 29, no. 5, pp. 408-421. ISSN 0142-0615
- [68] Salgado, F., Pedrero, P.: Short-term operation planning on cogeneration systems: A survey. *Electr Power Syst Res*, 2008, vol. 78, no. 5, pp. 835-848. ISSN 0378-7796
- [69] Ko, A.,S., Chang, N.: Optimal planning of co-firing alternative fuels with coal in a power plant by grey nonlinear mixed integer programming model. *J Environ Manage*, 2008, vol. 88, no. 1, pp. 11-27. ISSN 0301-4797
- [70] De, S., Assadi, M.: Impact of cofiring biomass with coal in power plants – A techno-economic assessment. *Biomass Bioenergy*, 2009, vol. 33, no. 2, pp. 283-293. ISSN 0961-9534
- [71] Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B.,V., Leahy, M.: A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Appl Energy*, 2010, vol. 87, no. 4, pp. 1059-1082. ISSN 0306-2619
- [72] Lam, H.,L., Varbanov, P.,S., Klemeš, J.,J.: Optimisation of regional energy supply chains utilising renewables: P-graph approach. *Comput Chem Eng*, 2010, vol. 34, no. 5, pp. 782-792. ISSN 0098-1354
- [73] van Dyken, S., Bakken, B.,H., Skjelbred, H.,I.: Linear mixed-integer models for biomass supply chains with transport, storage and processing. *Energy*, 2010, vol. 35, no. 3, pp. 1338-1350. ISSN 0360-5442
- [74] European IPPC Bureau [online]. 2006 [cit. 2. února 2012]. Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration. Dostupné z <[http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/wi\\_bref\\_0806.pdf](http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/wi_bref_0806.pdf)>
- [75] Ibler, Z.: *Technický průvodce energetika - 1. díl*. 1. vyd. BEN-Technická literatura, 2002. 615 s. ISBN 80-7300-026-1
- [76] Benáčková, J. *Modelování energetického zdroje a plánování jeho provozu s využitím pokročilých matematických metod*. Brno, 2011. 62 s. Diplomová práce. FSI VUT v Brně. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D.
- [77] Zuwała J, Sciazko M. Full-scale co-firing trial tests of sawdust and bio-waste in pulverized coal-fired 230 t/h steam boiler. *Biomass Bioenergy* 2010;34:1165-74.
- [78] Vyhláška ze dne 30. září 2009 o podrobnostech způsobu určení elektřiny z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla založené na poptávce po užitečném teple a určení elektřiny z druhotných energetických zdrojů. In *Sbírka zákonů ročník 2009*. 2009, 108, s. 4814-4846.

- [79] Zákon ze dne 31. března 2005 o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie a o změně některých zákonů (zákon o podpoře využívání obnovitelných zdrojů). In *Sbírka předpisů České Republiky*. 2005, částka 66/2005 sbírky, s. 3726-3731.
- [80] Hájek, Z. *Náhrada fosilních paliv ve velkých energetických zdrojích*. Brno, 2010, 92 s. Diplomová práce. FSI VUT v Brně. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Touš.
- [81] Popela, P., Drápela, T., Pavlas, M., Touš, M.: Energy conception of an integrated system – II. Alternative solutions and optimization. *Chemical Engineering Transactions*, 2009, vol. 18, pp. 689-694. ISSN 1974-9791
- [82] Montgomery, D.C.: *Design and Analysis of Experiments*. 6th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. 643 p. ISBN 0-471-48735-X
- [83] Pronobis, M.: The influence of biomass co-combustion on boiler fouling and efficiency. *Fuel*, 2006, vol. 85, no. 4, pp. 474-480. ISSN 0016-2361
- [84] Touš, M., Ferdan, T., Pavlas, M., Ucekaj, V., Popela, P.: Waste-to-energy plant integrated into existing energy producing system. *Chemical Engineering Transactions*, 2011, vol. 25, pp. 501-506. ISSN 1974-9791

**PUBLIKACE AUTORA**

- [1] Houdková, L., Bébar, L., Kutil, J., Touš, M.: Efektivní energetické využití kalů z ÚČOV Praha. In *Zborník konferencie Ochrana ovzdušia 2008*. 1. Bratislava: Kongres management, s.r.o., 2008. s. 35-39. ISBN 978-80-89275-14- 4
- [2] Touš, M., Houdková, L., Bébar, L., Pavlas, M., Stehlík, P.: Waste-to-energy (W2E) software - a support tool for decision making process. *Chemical Engineering Transactions*, 2009, vol. 18, pp. 971-976. ISSN 1974- 9791
- [3] Pavlas, M., Touš, M.: Efficient waste-to- energy system as a contribution to clean technologies. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2009, vol. 11, no. 1, s. 19-29. ISSN 1618- 954X.
- [4] Bébar, L., Touš, M., Kropáč, J., Stehlík, P.: Současný stav a očekávané vývojové trendy termického zpracování odpadů. In *56. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2009*. 1. Praha: Česká společnost chemického inženýrství, 2009. ISBN 978-80-86059-51- 8.
- [5] Pavlas, M., Touš, M., Bébar, L.: Energeticky efektivní zpracování komunálních odpadů. In *Plné texty přednášek, 56. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2009*, CD- ROM. Praha: ČSCHI, 2009. ISBN 978-80-86059-51- 8.
- [6] Popela, P., Drápela, T., Pavlas, M., Touš, M.: Energy conception of an integrated system - II. Alternative solutions and optimization. *Chemical Engineering Transactions*, 2009, vol. 18, pp. 689-694. ISSN 1974- 9791.
- [7] Touš, M., Pavlas, M., Stehlík, P., Popela, P.: Technical Economic Optimization of Existing Combustion Plant Utilizing Coal and Biomass. In *Book of abstracts*. Lausanne, Switzerland: EPFL, 2010. pp. 1999-2006.
- [8] Touš, M., Popela, P., Pavlas, M., Stehlík, P., Drápela, T.: A stochastic programming approach to optimization of combustion plant utilizing coal and biomass. In *MENDEL 2010*. Brno: Brno University of technology, 2010. pp. 584-589. ISBN 978-80-214-4120- 0.
- [9] Touš, M., Pavlas, M., Stehlík, P., Popela, P.: Effective biomass integration into existing combustion plant. *Chemical Engineering Transactions*, 2010, vol. 21, pp. 403-408. ISSN 1974- 9791.
- [10] Pavlas, M., Touš, M., Bébar, L.: Energy efficient processing of waste. *Chemical Engineering Transactions*, 2010, vol. 21, pp. 841-846. ISSN 1974- 9791.
- [11] Pavlas, M., Touš, M., Bébar, L., Stehlík, P.: Waste to Energy - An Evaluation of the Environmental Impact. *Applied Thermal Engineering*, 2010, vol. 30, no. 16, pp. 2326-2332. ISSN 1359- 4311.
- [12] Touš, M., Ferdan, T., Pavlas, M., Ucekaj, V., Popela, P.: Waste-to- energy plant integrated into existing energy producing system. *Chemical Engineering Transactions*, 2011, vol. 25, s. 501-506. ISSN 1974- 9791.
- [13] Pavlas, M.; Touš, M.; Benáčková, J.; Hejl, M. Určení výhřevnosti směsného komunálního odpadu statistickou analýzou výrobních ukazatelů ze zařízení EVO. In *58. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2011*. Praha: Česká společnost chemického inženýrství, 2011. s. 139-150. ISBN 978-80-905035-0- 2.



- [14] Kropáč, J., Pavlas, M., Fusek, M., Klimek, P., Touš, M.: Waste-to-Energy Systems Modelling Using In-House Developed Software. *Chemical Engineering Transactions*, 2011, vol. 25, pp. 533-538. ISSN 1974- 9791.
- [15] Touš, M., Pavlas, M., Stehlík, P., Popela, P.: Effective biomass integration into existing combustion plant. *Energy*, 2011, vol. 36, no. 8, pp. 4654-4662. ISSN 0360-5442.
- [16] Šomplák, R., Popela, P., Touš, M., Pavlas, M., Ucekaj, V.: Aplikace stochastického programování při plánování zařízení pro energetické využití odpadů. In 58. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2011. Praha: Česká společnost chemického inženýrství, 2011. s. 85-100. ISBN 978-80-905035-0- 2.
- [17] Pavlas, M., Touš, M., Klimek, P., Bébar, L.: Waste incineration with production of clean and reliable energy. *Journal of Cleaner Production*, 2011, vol. 13, no. 4, pp. 595-605. ISSN 0959- 6526.

**SEZNAM ZKRATEK**

ANOVA	analýza rozptylu
BAT	nejlepší dostupné techniky
COP	topný faktor
CF	chladič faktor
DZE	druhotné zdroje energie
EVO	energetické využití odpadů
HN přístup	“Here and now“ přístup stochastického programování
KO	komunální odpad
KVET	kombinovaná výroba elektřiny a tepla
LF	lehká frakce
LP	lineární programování
MBÚ	mechanicko-biologická úprava
MNČ	metoda nejmenších čtverců
MILP	celočíselné lineární programování
MINLP	celočíselné nelineární programování
NAP	národní akční plán
NLP	nelineární programování
OO	objemný odpad
OZE	obnovitelné zdroje energie
POP	persistentní organické látky
PCDD/F	polychlorované dibenzodioxiny/polychlorované dibenzofurany
SPRUK	směs popelovin pro rekultivaci a úpravu krajiny
SKO	směsný komunální odpad
SP	stochastické programování
SNCR	selektivní nekatalytická redukce
TZL	tuhé znečišťující látky
toe	tuna ekvivalentu ropy
VBA	Visual Basic for Applications
WS přístup	“Wait and see“ přístup stochastického programování

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

## Kapitola 4

$h_{BFW}$	(GJ/t)	entalpie napájecí vody
$h_{BW}$	(GJ/t)	entalpie kondenzátu z vytápění/maření
$h_{LUVO}$	(GJ/t)	entalpie kondenzátů z LUVO
$h_{PRIM,AIR}$	(GJ/m <sup>3</sup> )	entalpie přehřátého primárního vzduchu
$h_{ST,DEAR}$	(GJ/t)	entalpie páry do odplyňovače
$h_{ST}$	(GJ/t)	entalpie páry na výstupu z kotle
$h_{ST,HP,NET}$	(GJ/t)	měrné zvýšení entalpie páry v kotli
$h_{W,DEAR}$	(GJ/t)	entalpie vody do odplyňovače
$LHV_W$	(GJ/t)	výhřevnost odpadu
$m_{ST}$	(t/h)	množství vyrobené páry v kotli
$m_{ST,BUILD}$	(t/h)	množství páry potřebné pro vytápění
$m_{ST,DEAR}$	(t/h)	množství páry do odplyňovače
$m_{ST,EXP}$	(t/h)	export páry do Teplárny Liberec
$m_{ST,LUVO2}$	(t/h)	množství páry na LUVO 2
$m_{ST,LUVO3}$	(t/h)	množství páry na LUVO 3
$m_{ST,TECH}$	(t/h)	množství páry pro technologické účely
$m_{ST,TG2}$	(t/h)	množství páry vedené na TG2
$m_{ST,W}$	(t/h)	množství páry vyrobené v kotli pouze z energie z odpadu
$m_{ST,WASTE}$	(t/h)	množství mařené páry
$m_W$	(t/h)	množství dávkovaného odpadu
$m_{W,C}$	(t/h)	množství čířené vody
$m_{W,DEAR}$	(t/h)	množství vody do odplyňovače
$m_{W,DEMI}$	(t/h)	množství demi vody
$m_{W,DESUP}$	(t/h)	množství napájecí vody na zástřík
$m_{W,TECH}$	(t/h)	množství vody do technologie
$P_{ELE,EXP}$	(kW)	export elektřiny
$P_{in,TG1}$	(kPa)	tlak páry na vstupu na TG1
$P_{in,TG2}$	(kPa)	tlak páry na vstupu na TG2
$P_{out,TG1}$	(kPa)	tlak páry na výstupu z TG1
$P_{out,TG2}$	(kPa)	tlak páry na výstupu z TG2
$P_{TG1}$	(kW)	elektrický výkon TG1
$P_{TG2}$	(kW)	elektrický výkon TG2
$t_b$	(°C)	teplota spalin za kotlem

$t_{in,TG1}$	(°C)	teplota páry na vstupu na TG1
$t_{in,TG2}$	(°C)	teplota páry na vstupu na TG2
$V_{FG}$	(m <sup>3</sup> /h)	množství spalin
$V_{FG,STACK}$	(m <sup>3</sup> /h)	množství spalin na komín
$v_{PRIM,AIR}$	(m <sup>3</sup> /h)	průtok přehřátého primárního vzduchu

## Kapitola 5

### Množiny

$J$	množina paliv
$K$	množina kotlů
$M$	množina energií
$P$	množina turbín
$T$	množina období

### Konstanty

$\mathbf{a} = (a_{j,t}), j \in J, t \in T$	(t)	dostupné množství paliv
$aaCO2$	(kt/rok)	alokované množství emisí CO <sub>2</sub>
$aCO2p$	(€/t <sub>CO2</sub> )	cena emisní povolenky
$adc$	(€/t <sub>ash</sub> )	jednotková cena na likvidaci popela
$\mathbf{b} = (b_{k,t}), k \in K, t \in T$	(TJ)	kapacita kotle
$\mathbf{c} = (c_{p,t}), p \in P, t \in T$	(TJ)	kapacita turbín
$CaCO3p$	(€/t <sub>CaCO3</sub> )	jednotková cena CaCO <sub>3</sub>
$CaOp$	(€/t <sub>CaO</sub> )	jednotková cena CaO
$scCaCO3$	(t <sub>CaCO3</sub> /t <sub>s</sub> )	měrná spotřeba CaCO <sub>3</sub>
$scCaO$	(t <sub>CaO</sub> /t <sub>s</sub> )	měrná spotřeba CaO
$spCO2$	(t <sub>CO2</sub> /t <sub>coal</sub> )	měrná produkce CO <sub>2</sub>
$\mathbf{xa} = (xa_j), j \in J$	(% hm.)	obsah popela
$\mathbf{xp} = (xp_j), j \in J$	(-)	relativní cena paliv (referenční cena – cena uhlí)
$\mathbf{xs} = (xs_j), j \in J$	(% hm.)	obsah síry
$\mathbf{yp}^{RES-E} = (yp_j^{RES-E}), j \in J$	(€/GWh)	bonusy k elektřině z OZE
$\boldsymbol{\eta} = (\eta_k), k \in K$	(-)	účinnost kotle
$\boldsymbol{\xi} = (\xi_j), j \in J$	(TJ/t)	výhřevnost paliv

### Proměnné

$C_A$	(€)	náklady na likvidaci popela
$C_F$	(€)	náklady na nákup paliv
$C_S$	(€)	náklady na odsíření spalin
$I_{CO2}$	(€)	příjem z prodeje emisních povolenek
$I_E$	(€)	příjem z prodeje tepla a elektřiny

$I_{KVET}$	(€)	příjem z příplatků na elektřinu z kombinované výroby tepla a elektřiny
$I_{RES-E}$	(€)	příjem ze zelených bonusů
$\mathbf{u} = (u_{j,k,t})$ , $j \in J, k \in K, t \in T$	(TJ)	energetický příkon paliv
$\mathbf{v} = (v_{j,k,t})$ , $j \in J, k \in K, t \in T$	(TJ)	energie předaná vodě/páře
$\mathbf{w} = (w_{p,t})$ , $p \in P, t \in T$	(TJ)	energie (v páře) vedená na turbíny
$\mathbf{x} = (x_{j,k,t})$ , $j \in J, k \in K, t \in T$	(t)	množství paliv
$\mathbf{y} = (y_{p,m,t})$ , $p \in P, m \in M, t \in T$	(TJ)	energie vyrobená ve strojírně
$\mathbf{y}^- = (y_{p,t}^-)$ , $p \in P, t \in T$	(TJ)	mařené teplo
$\mathbf{y}^{ex} = (y_{m,t}^{ex})$ , $m \in M, t \in T$	(GWh, resp. TJ)	export elektřina, resp. tepla
$\mathbf{y}^{RES} = (y_{me,t}^{RES})$ , $t \in T$	(GWh)	elektřina z OZE
$\mathbf{y}^{sc} = (y_{m,t}^{sc})$ , $m \in M, t \in T$	(TJ)	vlastní spotřeba elektřiny/tepla
$z$	(€)	zisk (hodnota účelové funkce)

## Kapitola 6

$c$	(kW/(m <sup>3</sup> ·°C))	měrná tepelná kapacita vody při teplotě 15 °C
$m_{A,B,C}$	(m <sup>3</sup> /h)	průtok vody v režimu A/B/C
$m_{v/k,car}$	(m <sup>3</sup> /h)	průtok vody na výparníkové/kondenzátorové straně RJ
$P_{car,el}$	(kW)	elektrický příkon RJ
$P_{car,in}$	(kW)	chladicí výkon jednotky RJ
$P_{car,in,A/B/C}$	(kW)	chladicí výkon jednotky RJ v režimech A/B/C
$P_{car,out}$	(kW)	topný výkon jednotky RJ
$P_{top}$	(kW)	Topný výkon pro komplex budov
$t_{B/C}$	(°C)	teplota vody z výměníku řeka (režim B)/Dochlazování vratné vody kotlů (režim C)
$t_{chl,out}$	(°C)	teplota vody z chlazení areálu (režim A)
$t_{k,car,out}$	(°C)	teplota vody na výstupu kondenzátorové strany RJ
$t_s$	(°C)	teplota ve sběrači
$t_{vzduch}$	(°C)	teplota venkovního vzduchu
$t_{v,car,in/out}$	(°C)	teplota vody na vstupu/výstupu výparníkové strany RJ

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Celosvětová spotřeba energie [2].....	3
Obr. 2 Podíl různých druhů OZE na výrobě energie v EU v roce 2010 [10] .....	4
Obr. 3 Hierarchie nakládání s odpady [13].....	5
Obr. 4 Technologické schéma zařízení na energetické využití odpadů [15] .....	7
Obr. 5 Množství KO k termickému zpracování jako kombinace závazků ČR vůči EU a očekávaného vývoje produkce KO .....	10
Obr. 6 Vývoj množství energeticky využitého TKO [25] .....	11
Obr. 7 Vývoj výroby elektřiny z TKO [25] .....	12
Obr. 8 Rozmístění existujících a plánovaných zařízení EVO.....	12
Obr. 9 Rozložení výroby elektřiny z OZE v ČR v roce 2010.....	14
Obr. 10 Vývoj výroby elektřiny z biomasy [11].....	15
Obr. 11 Srovnání modelů turbín s reálnými daty.....	18
Obr. 12 Diagnostické grafy pro různé datové soubory [48] .....	20
<i>Obr. 13 Srovnání způsobů modelování: a) určení fixní vnitřní termodynamické účinnosti parní turbíny, b) porovnání regresního a termodynamického modelu .....</i>	<i>21</i>
Obr. 14 Znázornění recyklu ve schématu .....	22
Obr. 15 Technologické schéma generované ve W2E – systém využití páry v zařízení EVO .....	23
Obr. 16 Formulář kritérií pro hodnocení zařízení EVO.....	24
Obr. 17 Hodnota úspor primární energie pro různé provozní režimy [53] .....	25
Obr. 18 Základní technologické schéma TERMIZO .....	33
Obr. 19 Výkonový diagram roštu .....	34
Obr. 20 Parní cyklus TERMIZO s vyznačenými podstatnými proudy.....	36
Obr. 21 Stěžejní bloky a proudy v TERMIZO zahrnuté do modelu.....	37
Obr. 22 Schéma upraveného výpočtu výhřevnosti odpadu .....	42
Obr. 23 Krabicový graf výhřevnosti v jednotlivých měsících.....	43
Obr. 24 Aproximace rozdělení výhřevnosti log-normálním rozdělením.....	44
Obr. 25 Prostorový graf četnosti pozorování jednotlivých výkonových pásem.....	45
Obr. 26 Četnost pozorování jednotlivých výkonových pásem .....	46
Obr. 27 Křivka regresní funkce pro výpočet množství páry.....	47
Obr. 28 Bodový graf měrné výroby elektřiny v závislosti na páře.....	48
Obr. 29 Vstupní a isoentropická výstupní entalpie páry na TG1 .....	49
Obr. 30 Teoretický entalpický spád na TG1 .....	49
Obr. 31 Křivka regresní funkce pro výpočet výkonu TG1 .....	50
Obr. 32 Vnitřní termodynamická účinnost TG1 .....	51
Obr. 33 Křivka regresní funkce pro výpočet výkonu TG2 .....	52
Obr. 34 Vnitřní termodynamická účinnost na TG2 .....	52
Obr. 35 Křivka regresní funkce pro výpočet exportu elektřiny .....	53
Obr. 36 Bodové grafy závislosti exportu páry na výrobě páry v jednotlivých měsících.....	54
Obr. 37 Schéma výpočtového algoritmu celkového modelu TERMIZO .....	55
Obr. 38 Odchylna výroby páry pro všechny datové sady .....	56
Obr. 39 Diagram spalovacího roštu .....	57

Obr. 40 Schéma zařízení s hlavními ukazateli – implementace v MS Excel .....	59
Obr. 41 Histogram výhřevnosti v měsíci lednu .....	60
Obr. 42 Histogram tržeb .....	61
Obr. 43 Distribuční funkce tržeb .....	61
Obr. 44 Blokové schéma modelového teplárenského provozu.....	63
Obr. 45 Schéma zapojení turbín.....	63
Obr. 46 Poptávka po teple a elektřině .....	69
Obr. 47 Princip fungování uživatelského rozhraní v MS Excel a výpočtového jádra v GAMS .....	69
Obr. 48 Optimální plán dávkování paliv.....	70
Obr. 49 Využití energie paliv.....	70
Obr. 50 Podíl elektřiny z uhlí a elektřiny z biomasových paliv.....	71
Obr. 51 Závislost vypočítané elektřiny z biomasy na výrobě tepla.....	71
Obr. 52 Porovnání scénářů a) příjmy, b) výdaje .....	72
Obr. 53 Citlivost využití biomasových paliv na nárůstu jejich ceny .....	72
Obr. 54 Rozložení dávkování dřevní štěrky při zvýšené ceně .....	73
Obr. 55 Citlivost využití biomasových paliv na pokles zelených bonusů .....	73
Obr. 56 Ilustrace scénářů průběhů poptávky generovaných z rovnoměrného rozložení.....	74
Obr. 57 Histogram využití biomasových paliv .....	75
Obr. 58 Zobecněné schéma teplárenského provozu .....	76
Obr. 59 Schéma energetického systému komplexu budov .....	79
Obr. 60 Implementace modelu do MS Excel a uživatelské rozhraní modelu (vytápění) ....	80
Obr. 61 Závislost výroby tepla na venkovní teplotě .....	81
Obr. 62 Závislost výroby tepla na venkovní teplotě – srovnání v časových pásmech .....	81
Obr. 63 Schéma okruhů s chladivem v jednotce reverzní chladicí jednotky.....	82
Obr. 64 Schéma reverzní chladicí jednotky .....	83
Obr. 65 COP, výkon a příkon jednotky reverzní chladicí jednotky.....	83
Obr. 66 Regresní funkce pro výpočet topného faktoru reverzní chladicí jednotky .....	85

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 Přehled aktivit .....	6
Tab. 2 Vývoj produkce komunálních odpadů [21] .....	9
Tab. 3 Množství KO určených k termickému zpracování [21] .....	9
Tab. 4 Přehled cílů v oblasti tvorby technicko-ekonomických modelů zařízení EVO .....	31
Tab. 5 Přehled cílů v oblasti tvorby technicko-ekonomických modelů teplárenských provozů .....	32
Tab. 6 Výkonové parametry TERMIZO Pozn.: množství elektrické energie vyrobené na TG2 závisí na průtoku páry turbínou (viz výše), ten je tím vyšší, čím nižší je export páry do Teplárny Liberec .....	35
Tab. 7 Stěžejní parametry TERMIZO .....	38
Tab. 8 Průměry a rozptyly výhřevnosti odpadu pro měsíce leden a červen .....	43
Tab. 9 Proměnné v modelu výroby páry .....	47
Tab. 10 Parametry modelu výroby páry .....	47
Tab. 11 Proměnné v modelu výkonu TG1 .....	50
Tab. 12 Parametry modelu výkonu TG1 .....	50
Tab. 13 Proměnné v modelu výkonu TG2 .....	51
Tab. 14 Parametry modelu výkonu TG2 .....	51
Tab. 15 Proměnné v modelu exportu elektrické energie .....	53
Tab. 16 Parametry modelu exportu elektrické energie .....	53
Tab. 17 Výsledky srovnání modelu s provozními daty .....	56
Tab. 18 Výsledky srovnání modelu s výstupy z W2E .....	57
Tab. 19 Parametry paliv .....	68
Tab. 20 konstanty pro regresní funkci odhadu požadovaného topného výkonu .....	80
Tab. 21 provozní data reverzní chladicí jednotky .....	84